

Черкаський державний технологічний університет
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БОНДАРЕНКО МАКСИМ ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 620.17:620.3 (043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ
ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ХАРАКТЕРИСТИК
КОМПОНЕНТІВ МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ**

05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ М. О. Бондаренко

Науковий консультант **Ващенко Вячеслав Андрійович**
доктор технічних наук, професор

Черкаси – 2018

Анотація

Бондаренко М.О. Розвиток методів та засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю характеристик компонентів мікросистемної техніки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.11.13 “Прилади і методи контролю та визначення складу речовин”. – Черкаський державний технологічний університет Міністерства освіти і науки України; Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” Міністерства освіти і науки України, Київ, 2018.

На сучасному етапі розвитку технологій та засобів їх реалізації, пристрої та компоненти мікросистемної техніки (МСТ) набувають все більш широкого застосування в різноманітних сферах точного приладобудування, авіакосмічної техніки, медицини тощо. Стрімкий розвиток МСТ спричинений рядом їх беззаперечних переваг: мініатюрністю, високою функціональністю, технологічністю, експлуатаційною надійністю, низьким рівнем енергоспоживання, можливістю інтегрування в більш складні системи та інших. Більш суворі вимоги до стану поверхні та механічних характеристик МСТ при їх виготовленні та експлуатації вимагають застосування до МСТ замість традиційних методів візуального та вимірювального контролю (оптичної та електронної мікроскопії, профілометрії, індентування та інших при дослідженні геометричних та механічних характеристик МСТ) нових високоефективних та експресних методів неруйнівного контролю.

Серед методів неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик МСТ перспективними є методи атомно-силової мікроскопії (АСМ), що мають суттєві переваги у порівнянні з іншими методами, а саме: атомарну роздільну здатність при визначенні параметрів рельєфу поверхонь

композиційних матеріалів, високу чутливість зонду АСМ при силовій взаємодії з поверхнею, високу гнучкість режимів роботи АСМ, можливість проведення досліджень як на повітрі, так і у вакуумі, і в рідкому середовищі. Це дозволяє отримати повну інформацію про стан, топологію та фізичні характеристики поверхонь компонентів МСТ.

Незважаючи на вищезазначені переваги методів АСМ, їх практичне застосування при контролі геометричних та механічних характеристик матеріалів обмежується рядом невирішених досі питань: недостатньою вивченістю процесів силової та енергетичної взаємодії зондів АСМ з поверхнями; відсутністю інструментарію для проведення комплексних експресних вимірювань та контролю параметрів геометричних і механічних характеристик на обраній ділянці поверхні контрольованого об'єкту; недостатньою автоматизацією процесу контролю цих характеристик, тощо.

Слід зауважити, що дослідження методами АСМ компонентів МСТ переважно проводяться на повітрі, коли на процес та результати роботи здійснюють суттєвий вплив такі дестабілізуючі фактори, як: кліматичні факторів оточуючого середовища (температура, відносна вологість, вміст шкідливих з'єднань, тощо) та робочі параметри процесу контролю (час релаксації, крок та швидкість сканування), які обираються емпіричним шляхом виходячи із власного досвіду дослідника

При цьому, неконтрольований вплив кліматичних факторів несе негативний характер, що веде до зменшення точності, чутливості та відтворюваності результатів контролю, а в ряді випадків – до пошкодження та руйнування зонду АСМ.

З іншого боку, неправильний вибір робочих параметрів веде до виникнення артефактів сканування і, як правило, невірної інтерпретації результатів дослідження.

Крім того, відсутні дані щодо врахування впливу кліматичних факторів та робочих параметрів контролю на метрологічні характеристики методів та засобів АСМ.

Тому удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів АСМ для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ шляхом розроблення математичних та експериментально-статистичних моделей, а також методичних, технічних та програмних засобів для автоматизації процесу контролю цих характеристик з урахування дії дестабілізуючих факторів є важливою і актуальною науково-технічною проблемою.

У вступі розкрито суть та стан наукової проблеми, обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, викладено наукові положення, які виносяться на захист, наведені дані щодо наукової новизни, обґрунтована достовірність та показана практична цінність отриманих наукових результатів, наведені дані про публікації та апробацію роботи.

У першому розділі виконано огляд літературних джерел та джерел Інтернет щодо сучасного стану проблеми удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів АСМ для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ, функціональних можливостей і переваг методу АСМ при контролі характеристик таких компонентів; приведено класифікацію цих компонентів та методів дослідження їх характеристик з посиланням на існуючі вітчизняні та закордонні стандарти. Визначено чинники, які впливають на точність, чутливість та відтворюваність результатів контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ, в результаті чого сформульовано мету і задачі дисертаційної роботи.

В другому розділі проводиться обґрунтування вибору об'єктів контролю, розробка комплексу наукових методик теоретичних розрахунків, експериментальних досліджень та обробки результатів експерименту, а також наводиться опис експериментального та вимірювального обладнання.

На основі розробленого комплексу методик складено узагальнений алгоритм проведення неруйнівного контролю характеристик компонентів

МСТ методом АСМ. Запропонований комплекс методик для проведення та математичної обробки результатів контролю методом АСМ, а також розроблений вимірювальний стенд дозволили зменшити час контролю мікрогеометрії та фізико-механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ на 30 – 50%, а також зменшити кількість дефектів та артефактів сканування у 13 – 18 разів

У *третьому розділі* наведено результати теоретичних досліджень процесів, на основі яких розроблені уточнені математичні моделі силової та енергетичної взаємодії зондів АСМ з поверхнями матеріалів на підготовчій, завершальній стадіях та стадії сканування поверхні, що дозволяють визначати режими стабільної роботи процесу контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ.

Проведене математичне моделювання процесів силової та енергетичної взаємодії зондів АСМ з поверхнями матеріалів на підготовчій, завершальній стадіях та стадії сканування досліджуваної поверхні дало можливість визначити лімітуючі фактори (сили електростатичної F_{ec} , капілярної F_k взаємодії та дисипацію тепла в зоні фізичного контакту зонду з поверхнею в результаті його тертя по поверхні Q_I), що негативно впливають, як на результати вимірювань, так і на стан зонду та поверхні. Мінімізація таких лімітуючих факторів шляхом застосування оригінальних технічних рішень, дозволила більш точно (відносна похибка зменшується на 2 – 3,5%, а коефіцієнт варіації – на 2 – 2,4%) встановити діапазон робочих параметрів сканування, що забезпечують стабільну роботу АСМ в процесі контролю: швидкість сканування (18 – 26) нм/с; час механічної релаксації $(4,8 – 6) \cdot 10^{-3}$ с; крок сканування (78 – 82) нм.

Четвертий розділ дисертаційного дослідження присвячений розробленню та дослідженню нових експериментально-статистичних моделей для оцінювання впливу кліматичних факторів та робочих параметрів АСМ при застосуванні та довготривалому зберіганні зонду на процес неруйнівного контролю, а також встановлені діапазони характеристик, в

межах яких підвищується точність, чутливість та відтворюваність результатів контролю при визначенні характеристик компонентів МСТ. Розроблені нові експериментально-статистичні моделі дозволили встановити нові закономірності за якими оцінити вплив кліматичних факторів та робочих параметрів контролю при застосуванні і довготривалому зберіганні зондів АСМ на точність, чутливість та відтворюваність результатів контролю характеристик поверхонь компонентів МСТ. Встановлені за допомогою цих моделей раціональні діапазони кліматичних факторів збільшили приведений термін експлуатації зонду на 30 – 40%, ймовірність його безвідмовної роботи – з 0,89 – 0,93 до 0,98 та зменшили в 1,2 – 3,4 рази швидкість корозії зонду.

В н'ятому розділі наводяться основні етапи розвитку інструментальної та апаратно-методичної баз АСМ, що ґрунтуються на розроблених в роботі методичному комплексі, математичних та експериментально-статистичних моделях, та які забезпечуватимуть підвищення точності, чутливості, відтворюваності та надійності контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ з високою точністю, відтворюваністю та надійністю. Вдосконалення автоматизованої системи контролю полягало у запровадженні системи діагностування та підключені до віддаленого серверу збереження даних, а також у вдосконаленні системи контролю на базі АСМ. В результаті запровадження вдосконаленої автоматизованої системи контролю зменшено час зворотного зв'язку на 28 – 32%, чим забезпечено своєчасне коректування алгоритму та режимів роботи АСМ. Це дозволило додатково підвищити швидкість проведення дослідження на 35 – 40% та забезпечити високу надійність роботи приладу.

На основі цього розроблено та реалізовано на практиці віртуальну лабораторію нанометричних випробувань, до переваг якої слід віднести автоматизацію процесу проведення експериментальних досліджень, уніфікацію інформації про геометричні та механічні характеристики об'єктів контролю та інше.

Запропоновано та науково обґрунтовано новий метод підвищення

точності, чутливості та відтворюваності процесу неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки на основі розробленого інструментального та програмно-апаратного забезпечення для автоматизації проведення контролю з урахування дії дестабілізуючих факторів. Це дозволило проводити високоточний (похибка 2,7 – 5,4%, чутливість 0,2 – 0,5 нм, відтворюваність – не більше 5%) та надійний (ймовірність безвідмовної роботи зондів 0,95 – 0,98) контроль характеристик об'єктів дослідження, гнучко керувати робочими параметрами процесу контролю, дозволяє звести до мінімуму вплив людського фактору, здійснювати віддалене управління та спостереження за вимірювальним процесом, виключити суб'єктивні фактори прийняття рішень, підвищити швидкість проведення контролю та розширити межі досліджуваної ділянки поверхні (у вертикальній площині з 2 – 3 мкм до 4,5 – 6 мкм) з одночасним збільшенням її деталізації.

У шостому розділі представлені результати експериментального випробування розробленого методу підвищення точності, чутливості та збіжності процесу неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки, а також наводиться порівняння цих результатів з результатами досліджень, отриманих базовим методом АСМ та альтернативними методами контролю механічних характеристик компонентів МСТ.

В результаті проведених досліджень та порівняння отриманих результатів з результатами, отриманими альтернативними методами (методами растрової електронної мікроскопії, трибометрії, мікротвердометрії за Віккерсом тощо), була встановлена висока точність (похибка визначення нанорельєфу та механічних характеристик не перевищує 4,8%) та надійність (ймовірність безвідмовної роботи вимірювальної системи, не менше 0,95 – 0,98) за умов проведення не менше десяти паралельних дослідів та врахування впливу кліматичних факторів зовнішнього середовища та раціональних робочих режимів експлуатації.

На основі узагальнення результатів досліджень, в розділі наводяться практичні рекомендації щодо використання удосконалених та розроблених методів і засобів АСМ для неруйнівного контролю компонентів МСТ в промисловості, наукових організаціях та в навчальному процесі закладів вищої освіти України.

Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає у наступному:

1. Вперше створена науково-обґрунтована методологія удосконалення методів та засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки шляхом розроблення математичних та експериментально-статистичних моделей, методичних, технічних та програмних засобів для автоматизації процесу контролю цих характеристик, що дозволяє покращити точність, підвищити чутливість та відтворюваність результатів контролю з урахуванням дії дестабілізуючих факторів.

2. Уточнено математичні моделі взаємодії зондів атомно-силових мікроскопів з поверхнями матеріалів шляхом врахування силових та енергетичних складових процесів, які дозволяють визначати лімітуючі фактори (сили електростатичної, капілярної взаємодії та дисипацію тепла в зоні фізичного контакту зонду з поверхнею), а також діапазони режимів стабільної роботи атомно-силових мікроскопів, що підвищує точність та відтворюваність результатів контролю.

3. Розроблено нові експериментально-статистичні моделі для оцінювання впливу кліматичних факторів та робочих параметрів атомно-силової мікроскопії при застосуванні та довготривалому зберіганні зонду на процес неруйнівного контролю, які дозволяють встановлювати значущість кожного з цих факторів, що впливають на точність, чутливість та відтворюваність результатів контролю.

4. Вперше встановлено нові закономірності впливу кліматичних факторів оточуючого середовища на результати контролю геометричних і механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки, що

дозволяють визначати діапазони зміни цих факторів, відхилення від яких призводить до погіршення точності, чутливості та відтворюваності отримуваних результатів.

5. Вперше визначено діапазони зміни робочих параметрів методу атомно-силової мікроскопії, в межах яких зменшується швидкість корозії поверхні зонду, що приводить до підвищення терміну його експлуатації та збільшення ймовірності безвідмовної роботи зонду.

6. Вперше встановлено, що застосування комбінованого електронно-променевого модифікування поверхонь зондів приладів атомно-силової мікроскопії приводить до покращення їх експлуатаційних характеристик, що дозволяє збільшити стійкість цих зондів до дії зовнішніх дестабілізуючих факторів, чим підвищується ймовірність їх безвідмовної роботи та термін експлуатації.

7. Розроблено новий метод підвищення точності, чутливості та відтворюваності процесу неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки на основі розробленого інструментального та програмно-апаратного забезпечення для автоматизації проведення контролю з урахуванням дії дестабілізуючих факторів.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційного дослідження становлять наукову основу для технічної реалізації та впровадження у виробництво та навчальний процес методичного, математичного, технічного та програмно-апаратного забезпечення процесу контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь методом АСМ. Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

– розроблено комплекс методик для проведення та математичної обробки результатів експериментальних досліджень методом АСМ для вимірювального контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь матеріалів (способи оцінки мікротвердості та зносостійкості

захищені патентами України на корисну модель №87907, №117635) та формування панорамних зображень досліджуваної ділянки з високою роздільною здатністю та деталізацією фрагментів її топології;

- створено алгоритм та програмно реалізовано узагальнену математичну модель, що дозволяє оцінити силову взаємодію та теплообмін між різними елементами блоку контролю АСМ на різних відстанях між зондом та поверхнею та визначити робочі, граничні та критичні параметри процесу контролю;

- запропоновано технологію виготовлення універсальних зондів АСМ та тест-решіток, а також отримано та апробовано зразки таких зондів для високоточного нанометричного комплексного контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ методом АСМ;

- розроблено і програмно реалізовано комплексний метод математичної обробки результатів визначення геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ, що дозволяє мінімізувати артефакти сканування, уніфікувати інформацію про стан поверхні та проводити обмін з іншими інформаційно-аналітичними системами математичної обробки результатів досліджень АСМ, і який покладено в основу створення віртуальної лабораторії нанометричних випробувань;

- розроблено автоматизовану систему вимірювання і контролю, яка містить удосконалений блок контролю в частині впровадження систем позиціонування лазерного променя на зонд АСМ (патент України на корисну модель №91425) та видалення залишкового трибоелектричного заряду (патент України на корисну модель №91523).

Ключові слова: неруйнівний контроль, атомно-силова мікроскопія, кліматичні фактори, робочі параметри, мікросистемна техніка, точність, чутливість, відтворюваність.

SUMMARY

Bondarenko M.O. Development of methods and means of atomic force microscopy for non-destructive testing of the characteristics of the components of microsystem technology. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

The dissertation for the degree of doctor of technical sciences on specialty 05.11.13 "Devices and methods of control and composition of substance". Cherkasy State Technological University of the Ministry of Education and Science of Ukraine; National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2018.

At the present stage of development of technologies and means of their implementation, devices and components of microsystem technology (MST) are becoming more widely used in various fields of precision instrument making, aerospace equipment, medicine. The rapid development of MST is due to a number of their undeniable advantages, such as: miniature, high functionality, manufacturability, operational reliability, low energy consumption, the ability to integrate into more complex systems, etc. More stringent requirements for the state of the surface and the mechanical characteristics of MST in their manufacture and operation require the application of new high-performance and express non-destructive testing methods to the MST. This makes it impossible to use traditional methods of visual and measurement control, such as: optical and electron microscopy, profilometry, indentation, and others, in the study of the geometric and mechanical characteristics of MST.

Among the methods of non-destructive testing of the geometric and mechanical characteristics of MST, atomic force microscopy (AFM) methods are promising, having significant advantages over other methods, namely: atomic resolution in determining surface parameters of composite materials, high sensitivity of the AFM probe when interacting with the surface, high flexibility of

the AFM operation modes, the possibility of conducting research both in air and in vacuum, and in a liquid medium. This allows you to get complete information about the state, topology and physical characteristics of the surfaces of the components of the MST.

Despite the above-mentioned advantages of the AFM methods, their practical application in controlling the geometric and mechanical characteristics of materials is limited to a number of unresolved issues so far: insufficient study of the processes of force and energy interaction of AFM probes with surfaces; lack of tools for carrying out complex express measurements and control of parameters of geometric and mechanical characteristics on a selected surface area of the object under test; insufficient automation of the process of controlling these characteristics, and the like.

It should be noted that research using AFM methods is mainly carried out in air, when destabilizing factors, such as: climatic environmental factors (temperature, relative humidity, the content of harmful compounds, etc.) and operating parameters of the control process (relaxation time, step and scan speed), chosen empirically based on the researcher's own experience.

At the same time, the uncontrolled influence of climatic factors is negative, which leads to a decrease in the accuracy, sensitivity and convergence of the control results, and in some cases to damage and destruction of the AFM probe.

On the other hand, incorrect selection of working parameters leads to scanning artifacts and, as a rule, incorrect interpretation of research results.

However, analysis of the literature and sources of the Internet shows the lack of information on taking into account the influence of climatic factors and operating parameters of the control on the metrological characteristics of the methods and means of AFM.

Therefore, a new solution to the scientific and technical problem of improving existing and creating new methods and means of atomic force microscopy for non-destructive testing of geometric and mechanical characteristics of the components of MST by developing mathematical and experimental

statistical models, as well as methodological, technical and software tools for automating the process of control of these characteristics, taking into account the action of destabilizing factors is relevant and is considered in this dissertation work.

The introduction reveals the essence and state of the scientific problem, substantiates the relevance of the dissertation work, sets out the purpose and objectives of the research, outlines the scientific provisions to be defended, provides information on scientific novelty, validates reliability, shows the practical value of the scientific results obtained, provides information on publications and approbation work.

The first chapter reviews the literature sources and sources of the Internet on the current state of the problem of improvement of existing and creation of new methods and means of atomic force microscopy for non-destructive testing of the geometric and mechanical characteristics of components of the MST, functionality and advantages of the AFM method while monitoring the characteristics of the components of MST devices; the classification of components and methods for studying their characteristics is given with reference to existing domestic and foreign standards. The factors affecting the accuracy, sensitivity and convergence of the results of monitoring the geometric and mechanical characteristics of the surfaces of the components of the microsystem technology are determined, as a result of which the goal and tasks of the thesis work are formulated.

The second section substantiates the choice of control objects, the development of a set of scientific methods for theoretical calculations, experimental studies and the processing of experimental results, and describes the experimental and measuring equipment.

On the basis of the developed set of techniques, a generalized algorithm for performing the non-destructive testing of the characteristics of the components of the MST by the method of AFM was compiled. The proposed complex of methods for carrying out and mathematical processing of the results of control by the AFM method, as well as the developed measuring stand, made it possible to reduce the

time of control the nano-geometry and mechanical characteristics of the surfaces of components of MST devices by 30 – 50%, and also to reduce the number of defects and scanning artifacts in 13 – 18 times.

The third section presents the results of theoretical studies of the processes on the basis of which the refined mathematical models of power and energy interaction of AFM probes with the surfaces of materials at the preparatory, final stages and the scanning stage of the investigated surface are developed, which allow to determine the modes of stable operation of the process of control the geometric and the mechanical characteristics of the surfaces of the components of MST products.

The mathematical modeling of the processes of power and energy interaction of AFM probes with the surfaces of materials at the preparatory, final stages and the scanning stage of the investigated surface allowed to determine the limiting factors (forces of electrostatic F_{es} , capillary F_k interaction and heat dissipation in the zone of physical contact of the probe with the surface as a result of its friction on the surface Q_l) that negatively affect both the measurement results and the state of the probe and the surface. The minimization of such limiting factors through the use of original technical solutions, allowed to more precisely (relative error decreases by 2 – 3,5%, and the coefficient of variation – by 2 – 2,4%) to determine a range of operating parameters of scanning, ensuring stable operation of AFM in the process of control and recommend to set: scanning speed (18 – 26) nm/s; mechanical relaxation time $(4,8 – 6) \cdot 10^{-3}$ s; scan step (78 – 82) nm.

The fourth section of the dissertation research is devoted to the study of the regularity of the influence of measurement conditions during the application and long-term storage of the probe on the metrological characteristics of the AFM method, as well as the establishment of the ranges of characteristics within which the metrological characteristics of the measurement results are increased in determining the surface state of the components of MST devices. The developed new experimental and statistical models allowed to establish new laws of on which to evaluate the influence of climatic factors and operating parameters of the control

during the application and long-term storage of AFM probes on the accuracy, sensitivity and reproducibility of the results of monitoring the characteristics of the surfaces of MST components on accuracy, sensitivity and convergence of results of control of characteristics of surfaces of components of MST devices. The rational ranges of climatic factors have increased the service life of operation of the probe by 30 – 40%, the probability of its failure-free operation was from 0,89 to 0,98 and decreased by 1,2 to 3,4 times the corrosion rate of the probe.

The fifth section presents the main stages of development of instrumental and hardware-methodical bases of AFM, based on the developed in the methodical complex, mathematical and experimental-statistical models, and providing an increase in the accuracy, sensitivity, convergence and reliability of control of the geometric and mechanical characteristics of components of MST devices. The improvement of the automated control system consisted in the introduction of a diagnostic system and connection to a remote storage server, as well as in the improvement of the control system based on AFM. As a result of the introduction of an improved automated control system, the feedback time was reduced by 28–32%, which ensured the timely adjustment of the algorithm and operating modes of the AFM. This made it possible to further increase the speed of the study by 35–40% and to ensure high reliability of the instrument.

On this basis, designed and implemented a virtual laboratory for nanometric testing, the benefits of which should include automation of experimental studies, harmonization of information on the geometric and mechanical characteristics of control objects, etc.

A new method of improving the accuracy, sensitivity and reproducibility of the process of non-destructive testing of the geometric and mechanical characteristics of microsystem engineering components based on the developed tool and software and hardware for automating the control, taking into account the actions of destabilizing factors, is proposed and scientifically grounded. It allowed to carry out high-precision (error 2,7 – 5,4%, sensitivity 0,2 – 0,5 nm, reproducibility – not more than 5%) and reliable (the probability of failure of

probes 0,95 – 0,98) control of characteristics of objects of research, flexibly manage the operating parameters of the control process, to minimize the impact of the human factor, to carry out remote control and monitoring of the measuring process, to exclude subjective factors of decision - making, to improve the speed of the control and to expand the boundaries of the study area of the surface (in a vertical plane from 2 – 3 microns to 4,5 – 6 microns) with a simultaneous increase in its detail.

The sixth section presents the results of an experimental test of the developed method of improving the accuracy, sensitivity and convergence of the process of non-destructive testing of the geometric and mechanical characteristics of the components of the microsystem technology, as well as a comparison of these results with the results of studies obtained by the basic AFM method and alternative methods for control the mechanical characteristics of components of MST devices.

As a result of the research and comparison of the obtained results with the results obtained by alternative methods (methods of scanning electron microscopy, tribometry, Vickers microhardness, etc.), high accuracy was established (the error in determining the geometric and mechanical characteristics does not exceed 4,8%) and reliability (probability of failure-free operation of the measuring system, not less than 0,95 – 0,98) in the conditions of conducting at least ten parallel experiments and taking into account the influence of climatic factors of external environments and rational operating modes of operation.

On the basis of generalization of research results, the section provides practical recommendations for the use of the improved and developed methods and means of AFM for non-destructive testing of components of MST devices in industry, scientific organizations and in the educational process of higher educational institutions of Ukraine.

The scientific novelty of the dissertation research is as follows:

1. For the first time, a scientifically based methodology has been created to improve the methods and means of atomic force microscopy for non-destructive

testing of the geometric and mechanical characteristics of microsystem engineering components by developing mathematical and experimental statistical models, using methodological, technical and software tools to automate the process of controlling these characteristics, improves accuracy, to increase the sensitivity and reproducibility of control results, taking into account destabilizing factors.

2. The mathematical models of the interaction of the probes of atomic force microscopes with the surfaces of materials have been clarified by taking into account the force and energy components of the processes that allow determining the limiting factors (forces of electrostatic, capillary interaction and heat dissipation in the zone of physical contact of the probe with the surface), as well as the ranges of modes of stable operation of atomic force microscopes, increases the accuracy and reproducibility of control results.

3. New experimental and statistical models have been developed to assess the influence of climatic factors and operating parameters of atomic force microscopy during the application and long-term storage of the probe on the process of non-destructive testing, which make it possible to establish the significance of each of these factors affecting the accuracy, sensitivity and reproducibility of the control results.

4. For the first time, new regularities of the influence of climatic environmental factors on the results of monitoring the geometrical and mechanical characteristics of the components of microsystem technology have been established.

5. For the first time, the ranges of changes in the working parameters of the atomic force microscopy method were determined, within which the corrosion rate of the probe surface decreases, which leads to an increase in its service life and an increase in the probability of trouble-free operation of the probe.

6. For the first time it has been established that the use of combined electron-beam modification of the probe surfaces of atomic force microscopy instruments leads to an improvement in their performance, which makes it possible to increase

the resistance of these probes to external destabilizing factors, thus increasing their probability of trouble-free operation and service life.

7. A new method was developed to improve the accuracy, sensitivity and reproducibility of the process of non-destructive testing of the geometric and mechanical characteristics of the components of microsystem engineering based on the developed tool and software and hardware for automating the monitoring, taking into account the actions of destabilizing factors.

Practical significance of the results. The results of the dissertation research form the scientific basis for the technical implementation and introduction into the production and educational process of the methodological, mathematical, hardware and software support of the process of control surface geometric and mechanical characteristics using the AFM method, the practical value of which is as follows:

- a set of methods for conducting and mathematical processing of the results of experimental studies by the AFM method is developed, which includes standard and original methods for measuring control of nano-geometry and the mechanical characteristics of material surfaces in a single measuring cycle (methods for estimating microhardness and wear resistance are protected by patents of Ukraine for a utility model №87907, №117635), the formation of panoramic images of the investigated area with high resolution and detailing fragments of its topology;

- developed the algorithm and implemented in software a mathematical model, allowing to estimate the force interaction and heat transfer between the various elements of the control unit of the AFM at different distances between the probe and the surface and to define work, extreme and critical process parameters control;

- the technology of manufacturing of universal AFM probes and test gratings was proposed, and also samples of such probes for high-precision nanometric complex control of nano-geometry and mechanical characteristics of surfaces of components of MST devices by AFM method in one measuring cycle were obtained and tested;

– the complex method of mathematical processing of results of determination of geometric and mechanical characteristics of components of MST devices is developed and programmatically realized that allows to minimize artifacts of scanning, to unify information on a condition of a surface and to exchange with other information and analytical systems of mathematical processing of results of researches of AFM and which is the basis of creation of virtual laboratory of nanometric tests;

– an automated measurement and control system has been developed, which contains an improved control unit in terms of introducing a laser beam positioning system to the probe of an atomic force microscope (patent of Ukraine on utility model №91425) and a system for removing residual triboelectric charge (patent of Ukraine №91523).

Keywords: non-destructive control, atomic-force microscopy, climatic factors, operation parameters, microsystem technology, accuracy, sensitivity, reproducibility.

Список публікацій здобувача

[1] Г. М. Дубровська, Н. І. Божко та М. О. Бондаренко, *Приклади застосування фізичних методів дослідження структури поверхні* (Удоун Офсет Принтерс, Сільхет, 2007), 248 с.

Здобувачем розроблено методикау вивчення мікрогеометрії поверхні композиційних матеріалів методом атомно-силової мікроскопії та представлено матеріали досліджень виконаних за даною методикою.

[2] В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, О. В. Верцанова, Ю. Ю. Бондаренко, С. О. Біло-кінь та М. О. Бондаренко, *Мікроскопія в нанотехнологіях* (НТУУ «КПІ», Київ, 2014), 258 с.

Здобувачем розроблено методологію проведення дослідження мікрорельєфу, поверхневих фізико-механічних та техніко-експлуатаційних властивостей матеріалів та нанометричних структур на таких поверхнях,

а також їхні оптичні, електричні та феромагнітні властивості з використанням методу АСМ.

[3] В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, Ю. Ю. Бондаренко, С. О. Білокінь, С. П. Раль-ченко, В. О. Андрієнко та М. О. Бондаренко, *Контроль параметрів якості функціональних покриттів* (НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, 2018), 396 с.

Здобувачем розроблено та обґрунтовано методики контролю параметрів якості функціональних покриттів методом атомно-силової мікроскопії.

[4] М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко и С. А. Шелестовская, “Исследование состояния поверхности кремниевых зондов для атомно-силовой микроскопии на точность и качество получаемых топограмм”, *Электроника и связь*. **61** (2). 14 – 17 (2011). **(видання включене до міжнародної наукометричної бази даних IndexCopernicus).**

Здобувачем доведена можливість модифікації поверхонь зондів, які пройшли інтенсивну експлуатацію, шляхом осадження на них тонких та ультратонких покриттів з подальшою електронною обробкою.

[5] Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко та Ю. Ю. Бондаренко, “Вплив режимів ультразвукового очищення п'єзоелектричних елементів на якість сформованих на їхніх поверхнях срібних електродів”, *Вісн. Нац. техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут”*. **64**. 87 – 90 (2012). **(видання включене до міжнародних наукометричних баз даних: Index Copernicus, Open Academic Journals Index (OAJI), CiteFactor, WorldCat, BASE, EBSCO та індексується директорією відкритого доступу (DOAJ)).**

Здобувачем проведені експериментальні дослідження процесу ультразвукового очищення поверхонь зразків п'єзоелектричних елементів перед нанесенням на них срібних електродів методом термічного осадження у вакуумі.

[6] В. С. Антонюк, П. О. Фіалковський та М. О. Бондаренко, “Дослідження характеристик біологічних об'єктів методами атомно-силової та растрової електронної мікроскопії”, *Вісн. Нац. техн. ун-ту України*

“Київський політехнічний інститут”. **47** (1). 145 – 149 (2014). **(видання включене до міжнародних наукометричних баз даних: Index Copernicus, BASE, WorldCat, OpenAIRE).**

Здобувачем проведені дослідження морфології та пружних властивостей біологічних об'єктів (на прикладі елементу суглоба) методом АСМ.

[7] М. О. Бондаренко, “Дослідження механічних характеристик елементів приладів точного приладобудування методом атомно-силової мікроскопії”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. (2), 21 – 28 (2015). **(видання включене до міжнародної наукометричної бази даних IndexCopernicus).**

[8] В. С. Антонюк, Ю. І. Коваленко, Ю. Ю. Бондаренко та М. О. Бондаренко, “Підвищення мікротвердості та зносостійкості поверхонь елементів виробів з оптичного скла мікрообробкою електронним потоком у вакуумі”, Вісн. Житомир. держ. технол. ун-ту. **72** (1). 3 – 8 (2015). **(видання включене до міжнародних наукометричних баз даних: Ulrich's Periodicals Directory, ResearchBib, UIF та індексується директором відкритого доступу (DOAJ)).**

Здобувачем запропоновані оптимальні режими низькоенергетичної електронно-променевої мікрообробки поверхонь оптичного скла К8, що приводить до покращення їх мікротвердості та зносостійкості.

[9] С. Ан. Клименко, С. А. Клименко та М. О. Бондаренко, “Дослідження топографії контактних поверхонь інструментів із ПНТМ на основі КНБ”, Вісн. Житомир. держ. технол. ун-ту. **73** (2). 51 – 58 (2015). **(видання включене до міжнародних наукометричних баз даних: Ulrich's Periodicals Directory, ResearchBib, UIF та індексується директором відкритого доступу (DOAJ)).**

Здобувачем проведено аналіз розподілу мікронерівностей, умовних сил тертя та адгезійної міцності по поверхні різального інструменту.

[10] І. В. Дробот, Т. Ю. Уткіна, М. П. Рудь та М. О. Бондаренко, “Автоматизована система моделювання процесу електронної обробки оптичних матеріалів”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. (3), 38 – 41 (2006).

Здобувачем проведені експериментальні дослідження за результатами роботи розробленої в статті автоматизованої системи моделювання електронної обробки.

[11] В. М. Шарапов, А. М. Гуржій та М. О. Бондаренко, “Исследование характеристик токопроводящих электропроводных пьезокерамических элементов”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. (спецвипуск), 255 – 257 (2007).

Здобувачем проведені дослідження методом АСМ зміни стану срібних електродів п'єзокерамічних елементів при їх довготривалому зберіганні.

[12] М. О. Бондаренко, “Дослідження впливу низькоенергетичного електронного потоку на мікрогеометрію поверхонь п'єзокерамічних елементів”, Труды Одесского политехнического университета. **32** (2), 149 – 153 (2009).

[13] М. А. Bondarenko, G. V. Kanashevich and H. V. Vertsanova, “Study of forming terms thin diamond similar nanostructures thermal vacuum-depositing”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. (спецвипуск), 114 – 116 (2009).

Здобувачем виявлено закономірність в зміні процентного вмісту компонентів в осаджуваному покритті в залежності від складу напилюваного матеріалу, його геометричних характеристик і хімічної чистоти матеріалу.

[14] М. О. Бондаренко, О. В. Котляр та Н. І. Божко, “Мікрогеометрія плівкових композиційних матеріалів на основі $\text{CuO-BaO-La}_2\text{O}_3$ ”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. (2), 55 – 58 (2009).

Здобувачем проведено вивчення внутрішнього тертя в отриманих тонких плівках для отримання інформації про внесок міжфазних поверхонь та про вплив матеріалу підложки (SiO_2) на стабільність та рівномірність мікрогеометрії поверхні.

[15] М. О. Бондаренко, В. А. Ващенко та С. О. Білокінь, “Вивчення умов утворення наноструктур на поверхнях п'єзоелектричних керамік під дією стрічкового електронного потоку”, Вісн. Східноукр. Нац. ун-ту ім. В. Даля. **162** (8). 30 – 34 (2011).

Здобувачем досліджено методом АСМ умови створення наноструктур на поверхні п'єзоелектричної кераміки електронно-променевим способом.

[16] С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко и Ю. Ю. Бондаренко, “Определение адгезионной прочности тонких оксидных покрытий на диэлектрических материалах методом атомно-силовой микроскопии”, Зб. наук. праць “Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології”. **12** (2). 295 – 302 (2014).

Здобувачем визначено адгезійну міцність тонких оксидних покриттів на діелектричних матеріалах із застосуванням методу атомно-силової мікроскопії з використанням багатопрохідного сканування зразка.

[17] М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко та В. С. Антонюк, “Перспективи використання методу атомно-силової мікроскопії для дослідження стану та фізико-механічних характеристик поверхонь виробів прецизійного машинобудування”, Вісн. нац. ун-ту «Львівська політехніка». (822), 72 – 77 (2015).

Здобувачем встановлені основні напрямки досліджень топограми та фізико-механічних характеристик поверхонь виробів прецизійного машинобудування.

[18] С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко та Ю. Ю. Бондаренко, “Дослідження фізичних характеристик діелектричних поверхонь за допомогою діагностичного стенда на базі АСМ”, Вісн. Чернігів. держ. технол. ун-ту. **78** (2), 176 – 181 (2015).

Здобувачем розроблена блок-схема та описана робота стенду та схеми автоматизації процесу вимірювання з використанням методу АСМ.

[19] С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко и В. С. Антонюк, “Влияние сил адгезии между исследуемой поверхностью и зондом для атомно-силовой микроскопии”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва). **12** (6). 41 – 45 (2012). URL: <http://www.mashin.ru/eshop/journals/nanoinzheneriya/2012/07/> (іноземне видання).

Здобувачем відпрацьовані робочі режими формування тонких покриттів діоксиду титану на поверхні кремнієвих зондів резистивним методом з їх подальшою електронно-променевою обробкою.

[20] V. S. Antonyuk, M. A. Bondarenko and Yu. Yu. Bondarenko, “Studies of thin wear-resistant carbon coatings and structures formed by thermal evaporation in a vacuum on piezoceramic materials”, Journal of superhard materials. **34** (4). 248 – 255 (2012). URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1063457612040065> (іноземне видання).

Здобувачем досліджено особливості отримання та вивчено умови формування зносостійких покриттів на п'єзокерамічних матеріалах термовакуумним осадженням.

[21] С. А. Билоконь, О. В. Свиридова, В. С. Антонюк и М. А. Бондаренко, “Повышение точности и срока эксплуатации зондов для атомно-силовой микроскопии”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва). **19** (1). 10 – 13 (2013). URL: <http://www.mashin.ru/eshop/journals/nanoinzheneriya/2013/18/> (іноземне видання).

Здобувачем вивчено процес підвищення точності та строку надійної експлуатації зондів для АСМ шляхом модифікації їх поверхонь вуглецевими покриттями.

[22] В. С. Антонюк, С. А. Билоконь и М. А. Бондаренко, “Особенности измерения микротвердости диэлектрических поверхностей кремниевым зондом атомно-силового микроскопа”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва). **33** (3). 13 – 16 (2014). URL: <http://www.mashin.ru/eshop/journals/nanoinzheneriya/2024/3/> (іноземне видання).

Здобувачем вивчена можливість вимірювання микротвердості діелектричних матеріалів кремнієвим зондом АСМ, модифікованим вуглецевим покриттям.

[23] V. S. Antonyuk, S. O. Bilokin and M. O. Bondarenko, “Formation of Wear-Resistant Coatings on Silicon Probes for Atomic Force Microscopy by

Thermal Vacuum Evaporation”, Journal of superhard materials. **37** (2), 112 – 119 (2015). URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1063457615020057> (іноземне видання).

Здобувачем перевірено якість нанесення покриттів та визначені їх мікротвердість та зносостійкість.

[24] M. Bondarenko, I. Bondarenko and V. Antoniuk, “Peculiarities of metalized surfaces modification of silicon elements of microelectromechanical systems with low-power electronic flow”, Materials science. Non-equilibrium phase transformations. III (2). 2017, 53 – 55 (2017). URL: <http://stumejournals.com/journals/ms/2017/2/53> (іноземне видання).

Здобувачем показана практична можливість методу атомно-силової мікроскопії оцінювати рівномірність тонких металевих покриттів на кремнієвих пластинах після електронної обробки.

[25] М. О. Бондаренко, С. О. Білокінь та В.С.Антонюк, “Механізм виникнення та нейтралізація залишкової трибоелектрики при скануванні кремнієвим зондом атомно-силового мікроскопу діелектричних поверхонь”, Ж. нано- електрон. фіз. **6** (2), 02018 – 1 (2014).

Здобувачем проведено розрахунок сил електростатичної взаємодії двох кремнієвих поверхонь та запропоновано модуль зняття електростатичного заряду.

[26] В. С. Антонюк, Ю. Ю. Бондаренко та М. О. Бондаренко, “Перспективи використання методу атомно-силової мікроскопії при комплексному контролі елементів приладів точного приладобудування”, Зб. наук. праць “Перспективні технології та прилади”. (5). 5 – 9 (2014).

Здобувачем розроблена технологія модифікування вимірювальних зондів АСМ функціональними покриттями для вимірювання різних фізичних параметрів і експлуатаційних характеристик досліджуваних поверхонь.

[27] В. С. Антонюк, С. О. Білокінь та М. О. Бондаренко, “Спосіб оцінки мікротвердості”, Патент України на корисну модель № 87907 (25 Лютий, 2014).

Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова.

[28] С. О. Білокінь, В. С. Антонюк та М. О. Бондаренко, “Спосіб видалення залишкового трибоелектричного заряду”, Патент України на корисну модель № 91425 (10 Липень, 2014).

Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова.

[29] С. О. Білокінь, В. С. Антонюк, Ю. І. Коваленко та М. О. Бондаренко, “Спосіб позиціонування лазерного променя на зонд атомно-силового мікроскопу”, Патент України на корисну модель № 91523 (10 Липень, 2014).

Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова.

[30] С. О. Білокінь, В. С. Антонюк та М. О. Бондаренко, “Спосіб оцінки зносостійкості тонких покриттів”, Патент України на корисну модель № 117635 (26 Червень, 2017).

Участь у створенні винаходу всіх співавторів однакова.

[31] М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко и Г. В. Канашевич, “Исследование поверхностей пьезокерамических элементов, модифицированных электронным потоком методом АСМ”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тезисы докл. VIII Междунар. сем. (Беларуская навука, Минск, 2008), с. 23 – 26.

Здобувачем проведене експериментальне дослідження поверхонь електродів на п'єзоелектричній кераміці методом АСМ.

[32] М. О. Бондаренко, Н. І. Божко та О. В. Котляр, “Вимірювання товщини тонких композиційних покриттів в процесі їхнього осадження у вакуумі”, в: Приладобудування – 2009: стан і перспективи: тези доп. VIII міжнар. наук.-техн. конф. (НТУУ “КПІ”, Київ, 2009), с. 188 – 189.

Здобувачем запропоновано метод вимірювання товщини тонких композиційних покриттів за допомогою кварцового резонатора.

[33] М. А. Бондаренко, М. П. Мусиенко та Ю. Ю. Бондаренко, “Виртуальная лаборатория атомно-силовой микроскопии и нанометрических исследований в современном технологическом университете”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тезисы докл. IX Междунар. сем. (Беларуская навука, Минск, 2010), с. 136 – 141.

Здобувачем розроблена концепція створення віртуальної лабораторії АСМ та нанометричних досліджень в сучасному технологічному закладі вищої освіти.

[34] M. A. Bondarenko, J. J. Bondarenko and S. A. Shelestovskaya, “Research of influence of the state of surface of probes for AFM on exactness and quality of the topograms”, in: Electronics and nanotechnology ELNANO 2011: thesis XXXI Intern. Scien. Conf. (NTUU “KPI”, Kyiv, 2011), pp. 60.

Здобувачем встановлено граничний термін експлуатації кремнієвих зондів для АСМ та показана можливість часткового відновлення поверхонь зондів, що пройшли інтенсивну експлуатацію.

[35] M. A. Bondarenko, “Necessity of creation of virtual laboratory of physical research of materials”, in: System analysis and information technologies SAIT 2011: thesis Intern. conf. of science and tech. (ESC “IASA” NTUU “KPI”, Kyiv, 2011), pp. 404.

[36] М. А. Бондаренко, С. А. Шелестовская и А. В. Котляр, “Исследование кремниевых зондов атомно-силовых микроскопов, восстановленных комбинированным термовакuumным методом”, в: Растровая электронная микроскопия и аналитические методы исследования твёрдых тел РЭМ-2011: тезисы докл. XVII Рос. симпоз. (Черноголовка, 2011), с. 78 – 79.

Здобувачем проведено аналіз результатів експерименту з електронно-променевої модифікації кремнієвих зондів АСМ, що експлуатувалися, та показана можливість часткового відновлення їх експлуатаційних властивостей.

[37] М. А. Бондаренко, С. А. Шелестовская и Ю. Ю. Бондаренко, “Влияние микротвердости исследуемого материала на эксплуатационную пригодность зондов для АСМ”, в: Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: тезисы докл. XIX междунар. конф. (Київ, 2011), с. 192 – 193.

Здобувачем встановлено вплив мікротвердості досліджуваного матеріалу на експлуатаційну придатність зондів для АСМ.

[38] М. А. Бондаренко, В. А. Андриенко и С. А. Билоконь, “Создание виртуальной лаборатории атомно-силовой микроскопии в технологическом университете”, в: Электронная микроскопия: тез. докл. XXIV Рос. конф. (Черноголовка, 2012), с.210–211.

Здобувачем прийнято участь у розробці та реалізації віртуальної лабораторії АСМ.

[39] С. А. Билоконь, И. А. Рева и М. А. Бондаренко, “Гидрофильное взаимодействие зонда атомно-силового микроскопа с диэлектрической поверхностью”, в: Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення та перспективи: тези доп. II Всеукр. наук.-практ. конф. мол. вчен. та студ. (Луцьк, 2012), с. 33 – 35.

Здобувачем розроблена методика визначення сил адгезії при гідрофільній взаємодії зонда АСМ з діелектричною поверхнею.

[40] С. А. Билоконь, И. А. Рева и М. А. Бондаренко, “Математическое моделирование процесса деформации измерительной системы АСМ и расчет допустимых режимов ее работы” в: Методол. аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тезисы докл. X Междунар. конф. (Беларуская навука, Минск, 2012), с. 297 – 301.

Здобувачем проведено аналітичний розрахунок процесу взаємодії зонда з різними поверхнями та показана залежність такої взаємодії від механічних властивостей матеріалу досліджуваного зразка.

[41] М. О. Бондаренко, Ю. І. Коваленко та І. А. Рева, “Оцінка адгезійної міцності на стирання оксидних покриттів на оптичному склі методом АСМ”, в: Приладо-будування: тези доп. XII міжнар. наук.-техн. конф. (НТУУ “КПІ”, Київ, 2013), с. 207.

Здобувачем розроблена методика вимірювання сили адгезійної міцності на стирання методом кривих підведення-відведення зонду АСМ до поверхні.

[42] Y. I. Kovalenko, M. A. Bondarenko and E. V. Vertsanova, “Study of ordered oxide patterns got on the dielectric surfaces with the combined electronic technology”, in: Physics and tech. of thin films and nanosyst.: thesis XIV Intern. conf. (Ivano-Frankivsk, 2013), pp. 92.

Здобувачем проведено дослідження упорядкованих оксидних структур на поверхнях діелектриків методом РЕМ.

[43] M. Bondarenko, Iu. Bondarenko and S. Bilokin, “Features of study of thin oxide coverages on the elements of microoptics and nanoelectronics by the method of AFM”, in: Electronics and Applied Physics: thesis IX intern. scient. conf. (Kyiv, 2013), pp. 54 – 55.

Здобувачем проведено вимірювання мікротвердості та зносостійкості оксидних покриттів на діелектрику методом АСМ за розробленою методикою склерометрії.

[44] С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко и Ю. Ю. Бондаренко, “Определение адгезионной прочности тонких оксидных покрытий на диэлектрических материалах методом АСМ”, в: Наноразмерные системы: строение, свойства, технологии НАНСИС-2013: тезисы докл. IV междунар. научн. конф. (НТУУ «КПІ», Киев, 2013), с. 369.

Здобувачем проведено аналіз АСМ-профілів покриття оксиду алюмінію на оптичному склі та визначена адгезійна міцність покриття.

[45] М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко та В. О. Андрієнко, “Корегування точності вимірювання методом атомно-силової мікроскопії нанорозмірних структур утворених на поверхнях функціональних матеріалів”, в: Приладобудування: стан і перспективи: тези доп. XIII міжнар. наук.-техн. конф. (НТУУ «КПІ», Київ, 2014), с.83–84.

Здобувачем визначено час надійної експлуатації зондів АСМ та проведено корегування точності вимірювання наноструктур на функціональних матеріалах.

[46] Ю. И. Коваленко, М. А. Бондаренко и Ю. Ю. Бондаренко, “Измерение микротвердости тонких оксидных покрытий на оптических диэлектриках методом атомно-силовой микроскопии”, в: Электронная микроскопия: тезисы докл. XXV Рос. конф. (Черноголовка, 2014), с. 308 – 309.

Здобувачем показана можливість проведення досліджень методом АСМ мікротвердості тонких оксидних покриттів, сформованих на оптичному діелектрику за різних режимів та при різних умовах.

[47] С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко и В. А. Андриенко, “Минимизация влияния капиллярных сил при исследовании поверхностей изделий наноэлектроники в контактном режиме атомно-силового микроскопа”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тезисы докл. XI Междунар. конф. (Беларуская навука, Минск, 2014), с. 164 – 168.

Здобувачем визначені оптимальні режими сканування поверхонь виробів наноелектроніки методом АСМ.

[48] С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко та В. С. Антонюк, “Керування змочуваністю зондів атомно-силового микроскопу для біологічних досліджень”, в: Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів: матер. XIII міжнар. наук.-техн. конф. (КрНУ, Кременчук, 2014), с. 89 – 90.

Здобувачем доведена можливість використання методу АСМ для маніпулювання біологічними об’єктами.

[49] М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко та С. О. Білокінь, “Діагностичний стенд для вимірювання фізичних характеристик поверхні на базі АСМ”, в: Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС-2015): тези доп. V міжнар. наук.-практ. конф. (ЧНТУ, Чернігів, 2015), с. 214 – 215.

Здобувачем розроблено діагностичний стенд та досліджено його роботу для вимірювання фізичних характеристик поверхні матеріалів.

[50] В. С. Антонюк, М. О. Бондаренко та Ю. Ю. Бондаренко, “Склерометрична оцінка зносостійкості тонких покриттів методом АСМ”, в: Инженерия поверхности и реновация изделий: тез. докл. XV Междунар. науч.-техн. конф. (Киев, 2015), с.17–19.

Здобувачем розроблена методика склерометричної оцінки зносостійкості тонких покриттів методом АСМ.

[51] I. Yatsenko, V. Antoniuk and M. Bondarenko, “Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making”, in: Innovations in ingeneering: Intern. scien.-tech. conf. (Burgas, Bulgaria, 2015), pp. 64 – 66.

Здобувачем проведено аналіз методом АСМ оптичних поверхонь до та після електронно-променевої обробки.

[52] М. О. Бондаренко та Ю. Ю. Бондаренко, “Автоматизований комплекс для нанометричних досліджень”, в: Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ-2016): тези доп. наук.-техн. конф. (СумДУ, Суми, 2016), с. 200.

Здобувачем запропонована ідея та прийнято участь у практичній реалізації автоматизованого комплексу для нанометричних досліджень .

[53] M. Bondarenko and I. Bondarenko, “Power supply method of micro- and nanosystem engineering devices”, in: Energy Challenges & Mechanics: 6th Intern. Symp. (Inverness, 2016), pp. 245 – 246.

Здобувачем експериментально обґрунтовано спосіб перетворення механічної енергії в електричну та показана можливість побудови на цьому способі пристроїв для мікро- та наносистемної техніки..

[54] С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко та В. С. Антонюк, “Автоматизація досліджень за допомогою АСМ”, в: Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: тезисы докл. 16 Межд. науч.-практ. конф. (АТМ України, Киев, 2016), с. 214 – 216.

Здобувачем запропоновано алгоритм автоматизації процесу дослідження механічних характеристик матеріалів методом АСМ.

[55] М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко и С. А. Билоконь, “Энергетический теплообмен в зоне контакта зонда атомно-силового микроскопа с исследуемой поверхностью”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тезисы докл. XII Междунар. конф. (Беларуская навука, Минск, 2016), с. 235 – 241.

Здобувачем проведено математичне моделювання процесу нагріву окремих елементів вимірювального блоку АСМ; складена та досліджена

еквівалентна теплова схема АСМ, що доводить адекватність розроблюваних математичних моделей.

[56] Ю. Ю. Бондаренко, М. О. Бондаренко и С. О. Білокінь, “Підвищення терміну експлуатації зондів атомно-силового мікроскопу”, в: Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2017): тези доп. VII міжнар. наук.-практ. конф. (ЧНТУ, Чернігів, 2017), с. 97 – 99.

Здобувачем були отримані результати дослідження мікрогеометричних параметрів оптичних елементів модифікованими та не модифікованими кремнієвими зондами АСМ та виконано їх порівняння.

[57] М. А. Бондаренко, К. В. Базило, Ю. Ю. Бондаренко и В. В. Медяник, “Изучение микроэлектромеханических пьезоэлектрических структур методом атомно-силовой микроскопии”, в: Датчики, прилади та системи – 2017: тези доп. VI Міжнар. науково-техн. конф. (ФОП Чабаненко А.Ю., Черкаси, 2017), с. 45 – 48.

Здобувачем розроблена методика визначення механічних характеристик при дослідженні методом АСМ поверхонь мікроелектромеханічних п'єзоструктур.

[58] С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко та В. О. Андрієнко, “Переваги використання методу атомно-силової мікроскопії в діагностиці нанооб'єктів та систем”, в: Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2018): тези доп. X міжнар. наук.-практ. конф. (НАУ, Київ, 2018), с. 100 – 102.

Здобувачем запропонована технологія модифікування вимірювальних зондів АСМ функціональними покриттями, що дозволяє проводити вимірювання різних фізичних параметрів та експлуатаційних характеристик нанооб'єктів та їх систем.

[59] I. I. Bondarenko, V. V. Medianyuk, M. A. Bondarenko and V. S. Titarenko, “Investigation of Ordered Structures Formed on the Surface of Piezoceramic Elements”, в: Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ-2018): тези доп. наук.-техн. конф. (СумДУ, Суми, 2018), с. 86.

Здобувачем проведені експериментальні дослідження методом АСМ наноструктур, утворених на поверхнях п'єзоелектричних керамік.

ЗМІСТ

	стор.
СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	40
ВСТУП	41
РОЗДІЛ 1. СТАН ПРОБЛЕМИ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ, ЧУТЛИВОСТІ ТА ВІДТВОРЮВАНOSTІ РЕЗУЛЬТАТІВ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТІВ МІКРОСИСТЕМ- НОЇ ТЕХНІКИ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ	52
1.1. Класифікація компонентів мікросистемної техніки та основні вимоги до них	54
1.2. Аналіз сучасних методів неруйнівного контролю поверхонь компонентів мікросистемної техніки	71
1.3. Аналіз методів та засобів скануючої зондової мікроскопії для вимірювання і контролю компонентів мікросистемної техніки	76
1.4. Основні чинники, що впливають на метрологічні характеристики процесу визначення геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів мікросистемної техніки методом атомно-силової мікроскопії.....	90
1.5. Висновки до розділу	96
Список використаних джерел	99
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ	114
2.1. Обґрунтування вибору об'єктів та засобів проведення досліджень	115
2.2. Комплекс наукових методик теоретичних розрахунків та	

експериментальних досліджень компонентів мікросистемної техніки методом атомно-силової мікроскопії	119
2.2.1. Методика комплексного контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів мікросистемної техніки	120
2.2.2. Визначення характеристик поверхневого шару матеріалів та тонких покриттів на них	122
2.2.3. Математична обробка результатів досліджень поверхні матеріалів	127
2.2.4. Оптимізація режимів контролю методом атомно-силової мікроскопії	140
2.2.5. Прогнозування терміну експлуатації зонду атомно-силового мікроскопу	143
2.2.6. Алгоритм проведення комплексного експериментально-теоретичного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки методом атомно-силової мікроскопії	147
2.3. Основні характеристики, принцип дії та результати роботи вимірювального стенду	151
2.4. Висновки до розділу	153
Список використаних джерел	155

РОЗДІЛ 3. ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

СИЛОВОЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЗОНДІВ АТОМНО-СИЛОВИХ МІКРОСКОПІВ З ПОВЕРХНЯМИ МАТЕРІАЛІВ ПРИ КОНТРОЛІ ГЕОМЕТРИЧНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

159

3.1. Фізичні процеси, що відбуваються в зоні взаємодії зонду атомно-силового мікроскопу з поверхнями матеріалів.....	159
3.1.1. Схеми силових та енергетичних зв'язків у блоці	

контролю атомно-силового мікроскопу.....	161
3.1.2. Розрахунок силової взаємодії зонду атомно- силового мікроскопу з поверхнями матеріалів	164
3.1.3. Визначення умов контактного руйнування зонду атомно-силового мікроскопу.....	180
3.2. Фізико-математичне моделювання процесу нагрівання у блоці контролю атомно-силового мікроскопу при дослідженні пристроїв мікросистемної техніки	186
3.2.1. Математична модель процесу нагрівання пластини великої товщини (досліджуваний об'єкт)	187
3.2.2. Математична модель процесу нагрівання пластини малої товщини (консолі)	189
3.2.3. Математична модель процесу нагрівання поверхні напівсферичного елемента (вістря зонду)	194
3.2.4. Математична модель процесу нагрівання торцевої поверхні циліндричного елемента (п'єзосканера)	195
3.2.5. Чисельне розв'язання математичних моделей процесу нагрівання у блоці контролю атомно-силового мікроскопу	198
3.2.6. Оцінка математичних моделей методом еквівалентних теплових схем	200
3.3. Визначення режимів стабільної роботи атомно-силового мікроскопу при контролі пристроїв мікросистемної техніки	205
3.4. Висновки до розділу	207
Список використаних джерел	208

РОЗДІЛ 4. ВПЛИВ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ФАКТОРІВ НА ЯКІСТЬ ПРОЦЕСУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ХАРАКТЕ- РИСТИК КОМПОНЕНТІВ МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЇ

МІКРОСКОПІЇ	212
4.1. Визначення закономірностей впливу кліматичних факторів оточуючого середовища на метрологічні характеристики методу атомно-силової мікроскопії	212
4.2. Визначення закономірностей впливу робочих параметрів сканування на метрологічні характеристики методу атомно-силової мікроскопії	221
4.3. Узагальнення результатів впливу кліматичних факторів оточуючого середовища та параметрів сканування на метрологічні характеристики методу атомно-силової мікроскопії	227
4.4. Уточнення термінів надійної експлуатації та довготривалого зберігання зондів атомно-силового мікроскопу	230
4.5. Висновки до розділу	235
Список використаних джерел	236
РОЗДІЛ 5. РОЗВИТОК ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ, ТЕХНІЧНОЇ ТА ПРОГРАМНО-МАТЕМАТИЧНОЇ БАЗИ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТІВ МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ	238
5.1. Основні вимоги до конструкції автоматизованих систем контролю на базі атомно-силових мікроскопів	239
5.2. Технологічні основи розробки та вдосконалення інструментарію для вимірювання і контролю поверхонь матеріалів методом атомно-силової мікроскопії	242
5.2.1. Технологічні аспекти виготовлення інструментарію для проведення нанометричних вимірювань і контролю	242
5.2.2. Виготовлення тестових структур для атомно-	

силової мікроскопії	243
5.2.3. Перспективи використання нестандартних структур в якості тест-об'єктів для атомно-силової мікроскопії	244
5.2.4. Аналіз результати калібрування атомно-силових мікроскопів при використанні тест-об'єктів	250
5.3. Розробка імітаційної моделі автоматизованої системи контролю	254
5.4. Розробка автоматизованої системи на базі атомно- силового мікроскопу для контролю характеристик пристроїв мікросистемної техніки	260
5.4.1. Розробка функціональної схеми автоматизованої системи контролю	265
5.4.2. Програмне забезпечення автоматизованої системи контролю	273
5.4.3. Розрахунок та дослідження процесу обміну інфор- мацією в автоматизованій системі контролю	276
5.4.4. Похибки визначення геометричних та механічних характеристик автоматизованою системою контролю	283
5.5. Віртуальна лабораторія нанометричних випробувань	284
5.6. Висновки до розділу	289
Список використаних джерел	290

РОЗДІЛ 6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИПРОБУВАННЯ АВТОМА- ТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧ- НИХ ТА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТІВ МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ 297

6.1. Визначення геометричних та механічних характеристик пристроїв мікросистемної техніки при неруйнівному контролі методом атомно-силової мікроскопії за різних	
--	--

умов та термінів їх експлуатації	298
6.1.1. Дослідження стану та топології поверхні	298
6.1.2. Дослідження та аналіз морфології поверхні	305
6.1.3. Визначення механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки	306
6.2. Оцінка оптимальних режимів контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки	318
6.3. Прогнозування терміну надійної експлуатації та біосумісності матеріалів методом атомно-силової мікроскопії за різних режимів експлуатації	320
6.4. Розширення функціональних можливостей автоматизо- ваної системи контролю на базі атомно-силового мікроскопу	328
6.5. Використання результатів дисертаційного дослідження в промисловості та в навчальному процесі закладів вищої освіти України	333
6.6. Висновки до розділу	337
Список використаних джерел	338
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ	346
ДОДАТКИ	349
ДОДАТОК А. Загальна методика проведення теоретичних та експериментальних досліджень	350
ДОДАТОК Б. Технологічні аспекти виготовлення інструментарію для проведення нанометричних вимірювань і контролю	351
ДОДАТОК В. Документація про наукову значимість, практичне використання та впровадження основних результатів роботи	377
ДОДАТОК Г. Інструкція по роботі з програмою для обробки	

інформації з автоматизованої системи контролю	395
ДОДАТОК Д. Визначення похибок при контролі геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки	406
ДОДАТОК Е. Список опублікованих праць за темою дисертації	419

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСМ – атомно-силова мікроскопія / атомно-силовий мікроскоп;
 ВЛНВ – віртуальна лабораторія нанометричних випробувань;
 ЗВ – зовнішній вплив;
 ІК – інформаційний канал;
 КД – керуюча дія на виконавчий пристрій;
 МЕМС – мікроелектромеханічні системи;
 МСТ – мікросистемна техніка;
 ОУ – об'єкт управління;
 ПНІ – пристрій накопичення інформації;
 ПОІ – пристрій обробки інформації;
 ПС – підсилювач сигналу;
 ПУС – пристрій узгодження сигналів;
 СЗМ – скануюча зондова мікроскопія;
 E – ефективний модуль Юнга, МПа;
 F – сила навантаження зонду, що діє на зразок, мН;
 $F_{від}$ – сила відведення зонда АСМ від поверхні, мН;
 $F_{під}$ – сила підведення зонда АСМ до поверхні, мН;
 F_{np} – сила пружності, мкН;
 H – мікротвердість, МПа;
 h – крок сканування, нм / товщина досліджуваного покриття, нм;
 k – безрозмірний коефіцієнт зносостійкості / кількість мікротріщин;
 N – кількість мікропор;
 P_A – ймовірність безвідмовної роботи вимірювальної системи;
 R – радіус вістря зонду атомно-силового мікроскопу, нм;
 T – температура зовнішнього середовища, К;
 V – швидкість сканування, нм/с;
 δ, ε – відносна похибка вимірювання;
 τ – час механічної релаксації, мс;
 φ – відносна вологість зовнішнього середовища, %;
 σ_{cm} – напруженість адгезійної міцності на стирання, МПа.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. На сучасному етапі розвитку технологій та засобів їх реалізації, пристрої та компоненти мікросистемної техніки (МСТ) набувають все більш широкого застосування в різноманітних сферах точного приладобудування, авіакосмічної техніки, медицини тощо. Стрімкий розвиток МСТ спричинений рядом їх беззаперечних переваг: мініатюрністю, високою функціональністю, технологічністю, експлуатаційною надійністю, низьким рівнем енергоспоживання, можливістю інтегрування в більш складні системи та інших. Більш суворі вимоги до стану поверхні та механічних характеристик МСТ при їх виготовленні та експлуатації вимагають застосування до МСТ замість традиційних методів візуального та вимірювального контролю (оптичної та електронної мікроскопії, профілометрії, індентування та інших при дослідженні геометричних та механічних характеристик МСТ) нових високоефективних та експресних методів неруйнівного контролю.

Серед методів неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик МСТ перспективними є методи атомно-силової мікроскопії (АСМ), що мають суттєві переваги у порівнянні з іншими методами, а саме: атомарну роздільну здатність при визначенні параметрів рельєфу поверхонь композиційних матеріалів, високу чутливість зонду АСМ при силовій взаємодії з поверхнею, високу гнучкість режимів роботи АСМ, можливість проведення досліджень як на повітрі, так і у вакуумі, і в рідкому середовищі. Це дозволяє отримати повну інформацію про стан, топологію та фізичні характеристики поверхонь компонентів МСТ.

Незважаючи на вищезазначені переваги методів АСМ, їх практичне застосування при контролі геометричних та механічних характеристик матеріалів обмежується рядом невирішених досі питань: недостатньою вивченістю процесів силової та енергетичної взаємодії зондів АСМ з поверхнями; відсутністю інструментарію для проведення комплексних

експресних вимірювань та контролю параметрів геометричних і механічних характеристик на обраній ділянці поверхні контрольованого об'єкту; недостатньою автоматизацією процесу контролю цих характеристик, тощо.

Слід зауважити, що дослідження методами АСМ компонентів МСТ переважно проводяться на повітрі, коли на процес та результати роботи здійснюють суттєвий вплив такі дестабілізуючі фактори, як: кліматичні факторів оточуючого середовища (температура, відносна вологість, вміст шкідливих з'єднань, тощо) та робочі параметри процесу контролю (час релаксації, крок та швидкість сканування), які обираються емпіричним шляхом виходячи із власного досвіду дослідника

При цьому, неконтрольований вплив кліматичних факторів несе негативний характер, що веде до зменшення точності, чутливості та відтворюваності результатів контролю, а в ряді випадків – до пошкодження та руйнування зонду АСМ.

З іншого боку, неправильний вибір робочих параметрів веде до виникнення артефактів сканування і, як правило, невірної інтерпретації результатів дослідження.

Крім того, відсутні дані щодо врахування впливу кліматичних факторів та робочих параметрів контролю на метрологічні характеристики методів та засобів АСМ.

Тому удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів АСМ для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ шляхом розроблення математичних та експериментально-статистичних моделей, а також методичних, технічних та програмних засобів для автоматизації процесу контролю цих характеристик з урахування дії дестабілізуючих факторів є важливою і актуальною науково-технічною проблемою

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі фізики Черкаського державного технологічного університету. Дослідження пов'язані із планом науково-

дослідних робіт університету, які виконувались в період 2006-2018 років при безпосередній участі автора: “Отримання та фізико-хімічні дослідження властивостей тонких композиційних покриттів, модифікованих Р.З.Е. термовакуумним осадженням” (№ ДР 0106U004496, 2006-2008 р.р., керівник НДР), “Діагностика функціональних шарів у виробках мікрооптики і наноелектроніки, отриманих електронними технологіями” (№ ДР 0106U004500, 2006 – 2008 р.р., відп. виконавець НДР), “Технологічні основи електронної нанообробки поверхонь виробів із п’єзоелектричних керамік” (№ ДР 0109U002738, 2009 – 2010 р.р., відп. виконавець), “Технологічні основи отримання впорядкованих наноструктур на поверхнях зондів для атомно-силової мікроскопії” (№ ДР 0111U002932, 2011 – 2012 р.р., відп. виконавець), “Технологічні основи створення теплоізоляційних нанорозмірних оксидних покриттів на поверхнях оптичних діелектриків комбінованим термовакуумним осадженням” (№ ДР 0112U001701, 2012 – 2013 р.р., керівник НДР), “Розроблення поліметричних датчиків інформаційно-вимірювальних систем з живленням елементів від енергії вимірювального сигналу” (№ ДР 0115U000316, 2015 – 2016 р.р., виконавець НДР), “Розроблення бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж критичного застосування військово-цивільного призначення” (№ ДР 0117U000447, 2017 – 2018 р.р., виконавець НДР).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення науково-обґрунтованих основ удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю компонентів мікросистемної техніки шляхом застосування автоматизованих систем вимірювання і контролю геометричних та механічних характеристик цих компонентів з урахування дії дестабілізуючих факторів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі основні задачі:

1. На основі аналізу стану проблеми обґрунтувати науковий підхід

вирішення проблеми покращення методів та засобів атомно-силової мікроскопії для вимірювання і контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки.

2. Запропонувати наукову методологію оцінки впливу дестабілізуючих факторів (кліматичних факторів оточуючого середовища та робочих параметрів процесу контролю) на точність, чутливість та відтворюваність результатів, отримуваних за допомогою атомно-силової мікроскопії.

3. Розробити математичні моделі силової та енергетичної взаємодії зондів приладів атомно-силової мікроскопії з матеріалами на підготовчій, завершальній стадіях та стадії сканування, що дозволять визначити та мінімізувати лімітуючі фактори такої взаємодії, чим забезпечити стабільність процесу контролю геометричних та механічних характеристик цих матеріалів.

4. Розробити експериментально-статистичні моделі для оцінювання впливу кліматичних факторів та робочих параметрів атомно-силової мікроскопії на процес неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки.

5. Визначити діапазони кліматичних факторів та робочих параметрів методу атомно-силової мікроскопії, в межах яких відбувається покращення точності, підвищується чутливість та відтворюваність процесу контролю.

6. Встановити можливість застосування комбінованого електронно-променевого модифікування поверхонь зондів приладів атомно-силової мікроскопії для покращення їх експлуатаційних характеристик, що збільшить стійкість цих зондів до дії зовнішніх дестабілізуючих факторів.

7. Розробити метод підвищення точності, чутливості та відтворюваності процесу контролю характеристик компонентів мікросистемної техніки, що враховує дію дестабілізуючих факторів.

Об'єкт дослідження – процес контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь досліджуваних об'єктів методом атомно-силової мікроскопії.

Предмет дослідження – методи та засоби атомно-силової мікроскопії для вимірювання і контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених задач використовувалися сучасні аналітичні методи фізико-хімічного аналізу (растрової електронної мікроскопії (РЕМ), скануючої АСМ, рентгенофлуоресцентного аналізу, мікроідентування за Віккерсом); окремі положення теорій прямого та зворотного п'єзоефекту, контактної взаємодії в наносистемах, пружної, міжмолекулярної, електромагнітної взаємодії та технічної термодинаміки; чисельно-аналітичні методи розв'язання задач теплопровідності, метод еквівалентних теплових схем, метод імітаційного моделювання на базі математичного процесору "MatLab Simulink"; метод комбінованого електронно-променевого модифікування поверхні, а також методи математичної статистики для обробки експериментальних даних.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Вперше створена науково-обґрунтована методологія удосконалення методів та засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки шляхом розроблення математичних та експериментально-статистичних моделей, методичних, технічних та програмних засобів для автоматизації процесу контролю цих характеристик, що дозволяє покращити точність, підвищити чутливість та відтворюваність результатів контролю з урахуванням дії дестабілізуючих факторів.

2. Уточнено математичні моделі взаємодії зондів атомно-силових мікроскопів з поверхнями матеріалів шляхом врахування силових та енергетичних складових процесів, які дозволяють визначати лімітуючі фактори (сили електростатичної, капілярної взаємодії та дисипацію тепла в зоні фізичного контакту зонду з поверхнею), а також діапазони режимів стабільної роботи атомно-силових мікроскопів, що підвищує точність та відтворюваність результатів контролю.

3. Розроблено нові експериментально-статистичні моделі для оцінювання впливу кліматичних факторів та робочих параметрів атомно-силової мікроскопії при застосуванні та довготривалому зберіганні зонду на процес неруйнівного контролю, які дозволяють встановлювати значущість кожного з цих факторів, що впливають на точність, чутливість та відтворюваність результатів контролю.

4. Вперше встановлено нові закономірності впливу кліматичних факторів оточуючого середовища на результати контролю геометричних і механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки, що дозволяють визначати діапазони зміни цих факторів, відхилення від яких призводить до погіршення точності, чутливості та відтворюваності отримуваних результатів.

5. Вперше визначено діапазони зміни робочих параметрів методу атомно-силової мікроскопії, в межах яких зменшується швидкість корозії поверхні зонду, що приводить до підвищення терміну його експлуатації та збільшення ймовірності безвідмовної роботи зонду.

6. Вперше встановлено, що застосування комбінованого електронно-променевого модифікування поверхонь зондів приладів атомно-силової мікроскопії приводить до покращення їх експлуатаційних характеристик, що дозволяє збільшити стійкість цих зондів до дії зовнішніх дестабілізуючих факторів, чим підвищується ймовірність їх безвідмовної роботи та термін експлуатації.

7. Розроблено новий метод підвищення точності, чутливості та відтворюваності процесу неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки на основі розробленого інструментального та програмно-апаратного забезпечення для автоматизації проведення контролю з урахуванням дії дестабілізуючих факторів.

Практичне значення одержаних результатів. Результати дисертаційного дослідження становлять наукову основу для технічної

реалізації та впровадження у виробництво та навчальний процес методичного, математичного, технічного та програмно-апаратного забезпечення процесу контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь методом АСМ. Практична цінність отриманих результатів полягає в наступному:

- розроблено комплекс методик для проведення та математичної обробки результатів експериментальних досліджень методом АСМ для вимірювального контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь матеріалів (способи оцінки мікротвердості та зносостійкості захищені патентами України на корисну модель №87907, №117635) та формування панорамних зображень досліджуваної ділянки з високою роздільною здатністю та деталізацією фрагментів її топології;

- створено алгоритм та програмно реалізовано узагальнену математичну модель, що дозволяє оцінити силову взаємодію та теплообмін між різними елементами блоку контролю АСМ на різних відстанях між зондом та поверхнею та визначити робочі, граничні та критичні параметри процесу контролю;

- запропоновано технологію виготовлення універсальних зондів АСМ та тест-решіток, а також отримано та апробовано зразки таких зондів для високоточного нанометричного комплексного контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ методом АСМ;

- розроблено і програмно реалізовано комплексний метод математичної обробки результатів визначення геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ, що дозволяє мінімізувати артефакти сканування, уніфікувати інформацію про стан поверхні та проводити обмін з іншими інформаційно-аналітичними системами математичної обробки результатів досліджень АСМ, і який покладено в основу створення віртуальної лабораторії нанометричних випробувань;

- розроблено автоматизовану систему вимірювання і контролю, яка містить удосконалений блок контролю в частині впровадження систем

позиціонування лазерного променя на зонд АСМ (патент України на корисну модель №91425) та видалення залишкового трибоелектричного заряду (патент України на корисну модель №91523).

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, математичні моделі взаємодії зонду АСМ з поверхнями, а також розроблене методичне, технічне та програмно-апаратне забезпечення знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено актами впровадження) на підприємствах України (ІНМ ім.В.М.Бакуля НАН України, ТОВ “Мелітек-Україна” (м. Київ), ДП НВК “Фотоприлад” та ПАТ “Укрп’єзо” (м. Черкаси), а також за кордоном (ТДВ “Микротестмашины” (м. Гомель, Білорусь), Інститут тепло- і масообміну ім. А.В. Ликова НАН Білорусі (м. Мінськ, Білорусь).

Використання технологічних рекомендацій та розробленого методу покращення метрологічних характеристик АСМ дозволило підвищити точність результатів контролю характеристик компонентів МСТ (зменшити відносну похибку на 10 – 15%), збільшити ймовірність безвідмовної роботи зонду на 5 – 11%, зменшити кількість випадків виведення з ладу компонентів МСТ у 2,1 – 2,8 рази; підвищити термін експлуатації зондів у 2,6 – 3,5 рази; зменшити час контролю у 1,3 – 1,5 рази, а також отримати річний економічний ефект 200 тис. гривень.

Отримані у дисертаційній роботі результати використовуються у навчальному процесі при читанні лекцій, проведенні лабораторних та практичних занять, виконанні курсових та дипломних проектів з дисциплін “Наноматеріали та покриття у приладобудуванні”, “Теорія та практика експериментальних досліджень”, “Основи метрології та інформаційно-вимірювальної техніки”, “Нанотехнології в медичному приладобудуванні”, “Методи підвищення метрологічних характеристик приладів контролю та визначення складу речовин”, “Інтелектуальні технології вимірювання”, “Технічні засоби для дослідження впливу кліматичних факторів” та інших у НТУУ “Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”, а також у Черкаському державному технологічному університеті (підтверджено актами впровадження).

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, розрахункові та експериментальні результати отримано здобувачем самостійно. Наукові положення, що виносяться на захист, та висновки дисертаційної роботи належать автору.

У роботах, опублікованих у співавторстві:

- обґрунтовано доцільність застосування приведених методів проведення та обробки результатів теоретичних та експериментальних досліджень;

- отримані фізичні закономірності впливу кліматичних факторів та робочих параметрів сканування на результати контролю, за якими визначено раціональний діапазон робочих параметрів АСМ, що забезпечує високі точність, чутливість і відтворюваність результатів контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ;

- розроблено уточнені математичні моделі процесу силової та енергетичної взаємодії зондів АСМ з поверхнями матеріалів, що дозволило підвищити їх чутливість та визначити діапазони робочих параметрів (кроку та швидкості сканування, часу механічної релаксації) стабільної роботи пристроїв АСМ;

- розроблено випробувальний стенд та оригінальні методики для комплексного контролю параметрів геометричних та механічних характеристик матеріалів методом АСМ, а також розроблено технологічні основи та проведено дослідне модифікування універсального інструментарію (зондів АСМ та тест-решіток) для нанометричного вимірювання і контролю;

- проведено мінімізацію похибок визначення геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ, а також проведено автоматизацію процесу контролю цих характеристик методом АСМ шляхом удосконалення блоку контролю приладу.

В патентах автору належать ідеї з удосконалення приладної бази методу, способи визначення методом АСМ таких механічних характеристик компонентів МСТ, як: мікротвердість та зносостійкість.

Апробація результатів дисертаційного дослідження. Матеріали, основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і опубліковані у збірках доповідей та матеріалів науково-технічних конференцій, семінарів, симпозіумів, а саме: Міжнародній науково-практичній конференції “Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии” (м. Мінськ, Білорусь, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016 pp.); Російському симпозіумі по растровій електронній мікроскопії та аналітичним методам дослідження твердих тіл (м. Чорноголовка, Росія, 2011 – 2012, 2014 pp.); Міжнародній науково-технічній конференції “Приладобудування: стан і перспективи” (м. Київ, 2009, 2013 – 2014 pp.); щорічній міжнародній конференції та виставці “Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики” (м. Ялта, 2011 pp.); International conference of science and technology “System analysis and information technologies” (Kyiv, 2011); International Scientific Conference ELNANO (м. Київ, 2011 p.); Міжнародній науково-технічній конференції “Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів” (м. Кременчук, 2014 p.); Міжнародній науково-технічній конференції “Инженерия поверхности и реновации изделий” (Одеська обл., с. Затока, 2015 p.); Всеукраїнській науково-практичній конференції “Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення та перспективи” (м. Луцьк, 2012 p.); Міжнародній науково-практичній конференції “Качество, стандартизация, контроль: теория и практика” (м. Київ, 2012, 2016 pp.); International scientific conference “Physics and technology of thin films and nanosystems” (Ivano-Frankivsk, 2013); International scientific conference “Electronics and Applied Physics” (Kyiv, 2013); Міжнародній науковій конференції “Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології” (м. Київ, 2013 p.); регіональній науково-практичній конференції “Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку” (м. Луцьк, 2014 p.); International scientific-technical conference “Innovations in engineering” (Burgas, Bulgaria, 2015); Міжнародній науково-практичній конференції “Комплексне забезпечення якості технологічних

процесів та систем” (м. Чернігів, 2015, 2017 pp.); International Symposium “Energy Challenges & Mechanics” (Inverness, Scotland, UK, 2016); науково-технічній конференції “Фізика, електроніка, електротехніка” (м. Суми, 2016, 2018 pp.); Міжнародній науково-практичній конференції "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси" (м. Київ, 2018 р.)

Публікації. Результати досліджень, що подані в дисертації, опубліковані у 59 наукових працях, у тому числі 3 монографіях, 21 статті у наукових фахових виданнях (з них 6 статей у виданнях іноземних держав, 6 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 4 патентах на корисну модель, 29 тезах доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 2 статтях у інших виданнях.

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається з анотації, змісту, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 427 сторінок, з них обсяг основного тексту – 272 сторінки, 117 рисунків, 26 таблиць, список використаних джерел складає 332 найменувань і займає 39 сторінок, а також 6 додатків на 78 сторінках.

РОЗДІЛ 1.

СТАН ПРОБЛЕМИ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ, ЧУТЛИВОСТІ ТА ВІДТВОРЮВАНOSTІ РЕЗУЛЬТАТІВ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТІВ МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ

Однією із основних проблем, що виникає при визначенні геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки (МСТ) є недостатня точність, чутливість та відтворюваність результатів визначення характеристик цих компонентів в процесі їх виготовлення та експлуатації. Вирішення даної проблеми полягає в покращенні метрологічних характеристик методу атомно-силової мікроскопії (АСМ) шляхом встановлення фізичних закономірностей впливу на них дестабілізуючих факторів.

Тому, в розділі проведено критичний аналіз вітчизняної та закордонної науково-технічної літератури з досягнень і проблем щодо підвищення точності, чутливості та відтворюваності результатів контролю характеристик компонентів МСТ. Розглянуто 160 вітчизняних та закордонних літературних джерел [1] – [160], частина з яких присвячена методам та засобам дослідження компонентів МСТ, а решта – основним теоретичним положенням, що пов'язані з процесами, які відбуваються при контролі геометричних та механічних характеристик методом АСМ.

Проведена оцінка наукових робіт, що стосуються проблеми розвитку методів та засобів контролю компонентів МСТ, встановлено шляхи розвитку цих методів при визначенні стану поверхні, її геометричних та механічних характеристик [38] – [61].

Особлива увага приділена розгляду та аналізу публікацій, в яких висвітлюються питання класифікації компонентів МСТ та методів дослідження фізичних і експлуатаційних характеристик цих елементів, серед

яких виділено методи скануючої зондової мікроскопії [104] – [108]. Зокрема, обґрунтовано, що саме методи АСМ, що входять до групи методів скануючої зондової мікроскопії, є найбільш ефективними та перспективними для вирішення вищезазначеної проблеми [119] – [122].

Показано, що значний науковий вклад у розвиток новітніх методів дослідження та контролю виробів МСТ, зокрема методу АСМ внесли багато вітчизняних і зарубіжних вчених, зокрема: Биков В.А., Бінніг Г., Брушан Б., Гербер К., Карбівський В.Л., Куейт К., Міронов В.Л., Рожицький М.М., Рорер Х., Свірідьонок А.І., Снежко Д.В., Чижик С.А., та інші [104], [122] – [126], [145], [151] – [153].

Вирішенню багатьох проблем з питань покращення метрологічних характеристик методу АСМ присвячені роботи: Дуба С.М., Жавнерка Г.К., Занавескіна М.Л., Кузнецової Т.А., Курільонка М.А., Литвин П.М., Магонова С.М., Свірідової О.В., Суслова А.А., Толстіхіної А.Л., та інших [104] – [108], [124], [127], [128].

Проаналізовано основні чинники, що впливають на точність і надійність процесу дослідження геометричних та механічних характеристик поверхонь МСТ.

На основі критичного аналізу визначене коло задач, які потребують вирішення і пов'язані з проблемою підвищення метрологічних характеристик методу АСМ. Це забезпечить раціональне керування процесом комплексного контролю компонентів пристроїв МСТ.

При реалізації поставлених задач, щодо підвищення точності, чутливості, надійності та відтворюваності результатів визначення параметрів геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ та розширення меж досліджуваної ділянки поверхні з одночасним збільшенням її деталізації, а також визначення терміну експлуатації зондів для АСМ необхідно дотримуватися вимог, які висуваються до цих пристроїв державними та міжнародними нормативними документами [62] – [64]. Дотримання таких вимог здійснюється встановленням нових фізичних

закономірностей впливу кліматичних факторів та робочих режимів на метрологічні характеристики методу АСМ, розробленням уточнених математичних та експериментально-статистичних моделей, а також спеціалізованого програмного забезпечення, що в цілому представляють собою наукові основи керування процесом контролю методом АСМ та мають важливе практичне значення для галузей мікросистемного та оптико-електромеханічного приладобудування.

1.1. Класифікація компонентів мікросистемної техніки та основні вимоги до них

Термін “пристрій мікросистемної техніки” (мікросистема) визначає останню як сукупність мікроелектронних керуючих і функціональних виконавчих елементів і компонентів в єдиному конструктивному виконанні, принцип дії яких оснований на електрофізичних, електромеханічних, електрохімічних, електронно-оптичних та фотохімічних процесах і явищах з урахуванням ефектів масштабування при переході від макро- до мікро- і нанорозмірних рівнів [1] – [13].

Мікроелектромеханічні системи (МЕМС, з англ. MEMS – Microelectromechanical Systems) є пристрої, які об’єднують в собі мікроелектронні та мікромеханічні компоненти (датчики, приводи, електронні керуючі схеми, тощо) виготовленні з використанням мікротехнологій [14] – [18]. Сам по собі прилад МЕМС є об’єднанням електричних та механічних елементів в одну систему з мініатюрними розмірами (значення розмірів механічних елементів найчастіше лежать у мікрометричному діапазоні), і який, як правило, містить мікрокомп’ютерну схему керування для здійснення запрограмованих дій у системі та обміну інформацією з іншими приладами та системами [19] – [23]. Ці пристрої (або системи), здатні сприймати, контролювати і приводити в дію на мікрорівні, а також створювати різноманітні ефекти на макрорівні.

Отже, мікроелектромеханічні системи – це інтегровані чи мікропроцесорні системи, які комбінують електричні та механічні компоненти, виготовлені за технологіями, сумісними з технологіями інтегральних схем з розмірами від мікрометрів до декількох міліметрів, а наявність зв'язків між актуаторами, давачами та системою обробки дає змогу сприймати та контролювати оточуюче середовище.

Назва “мікросистемні технології” (МСТ) вживається найчастіше в Європі. У країнах Америки здебільшого використовують назву “мікроелектромеханічні системи” (MEMS), а в країнах Азії поширеною є назва “мікромашини” або “мікронаука”, вказуючи на значну частку наукової роботи інженерів цієї галузі [24], [25]. При цьому, електронна складова таких пристроїв виготовляється з використанням технологій застосовуваних до інтегральних схем, тоді, як мікромеханічні компоненти виготовляються за допомогою складних маніпуляцій над кремнієм та іншими субстратами з використанням процесів мікрообробки. Такі процеси, як об'ємна і поверхнева мікрообробка, а також мікрообробка з високим коефіцієнтом пропорційності (HAR – High-Aspect-Ratio) дозволяє вибірково видаляти частини кремнію або додавати структурні шари для формування механічних та електромеханічних компонентів. У той час, як функціональні властивості інтегральних схем ґрунтуються на використанні електричних та електронних властивостей кремнію, МСТ використовують, окрім цього, механічні властивості кремнію.

Міжгалузевий характер пристроїв МСТ відображається у широкому спектрі їх виробництв та застосувань, – МСТ можна знайти в різноманітних галузях приладобудування, машинобудування, медицини, телекомунікацій, у метрологічних засобах та системах захисту, тощо [26] – [31].

В той же час, МСТ були визначені однією з найбільш перспективних технологій 21-го століття, що мають потенціал до якісного впливу на життя людини. За висновками експертів з аналізу ринку сьогодні одним з найперспективніших є ринок МСТ, що сягнув майже 11 млрд. доларів станом на 2018 рік зі значними показниками росту [32]. Про це свідчить велика

кількість державних, загальнонаціональних програм, перша з яких прийнята в Німеччині в 1998 році. Надалі аналогічні довгострокові програми з'явилися і в інших країнах світу: Японія 1999 року “Національна програма МСТ”; США, 2000 “Національна нанотехнологічна ініціатива”; Росія 2006 національна цільова програма “наноіндустрії і мікросистеми”, Україна 2007 в рамках сьомої рамкової програми Євросоюзу підпрограми “Нанонауки, нанотехнології, матеріали та нові технології виробництва”.

В Україні розробленням методів і засобів МСТ займаються працівники багатьох науково-освітніх, науково-дослідних та науково-виробничих закладів, підприємств та організацій, що спеціалізуються на розробках в галузях мікро- та нанотехнологій і серед яких: Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України (м. Київ), Донецький фізико-технічний інститут ім. О. О. Галкіна, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України (м. Київ), Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України (м. Київ), Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України (м. Львів), Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського”, Національний університет “Львівська політехніка”, Державне Підприємство “Львівський науково-дослідний радіотехнічний інститут”, Науково-виробниче об'єднання “Термоприлад”, Інститут монокристалів (м. Харків), Науковий-дослідний технологічний інститут приладобудування (м. Харків), Інститут електрозвар. ім. Є. О. Патона НАН України (м. Київ) та інші [33] – [37].

Значний вклад у створення теорії та розроблення засобів МСТ внесли: Барт Р. У., Вернер В. Д., Годжі Р., Гордієнко Ю. Є., Девід А. Хорслі, Дружинін А. О., Кауль А. Б., Кльоссен Е., Лін П., Лучінін В. В., Мюлер Р. С., Невлюдов І. Ш., Палагін В. А., Семенець В. В., Трімер У. С. – розроблення конструктивно-технологічних особливостей компонентів МСТ [38] – [54]; Алівісатос П., Ауазі Ф. А., Ваганов В. Д., Варадан В., Лишевський С. Є., Лобур М. В., Назмул І., Поляков П. Ф., Рожицький М. М., Стасюк З. В., Хорунжій В. А. – розроблення моделей та методів дослідження МСТ [55] –

[61] та інші.

Проте, як видно із вищеперерахованих праць, наукові дослідження в даній області не приділяють достатньої уваги розробленню методів і засобів дослідження на мікро- та нанометричному рівні точності, чутливості та надійності виготовлення виробів МСТ, а також засобів автоматичного контролю, адаптованих для технологій виготовлення виробів МСТ.

Стандартизація і класифікація МСТ. На сьогодні, в Україні ще не сформувалася певна усталена система стандартів для МСТ в їх класифікації, виготовленні та позначенні.

Серед міжнародних стандартів в області МСТ слід відзначити наступні стандарти [62] – [64]: Інституту інженерів електротехніки та електроніки (IEEE), стандарти Міжнародної електротехнічної комісії (IEC) та стандарти технічного комітету з мікро- і наноелектромеханічних систем при Асоціації виробників напівпровідникового устаткування (SEMI).

При класифікації мікросистем використовуються різні підходи, де поруч з мікроелектромеханічними системами знаходяться мікромеханічні, оптомеханічні та біомеханічні системи, рис.1.1 [65] – [68].

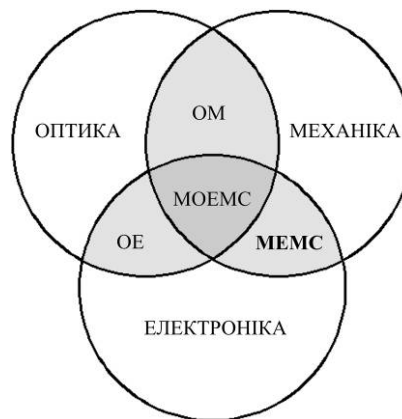


Рисунок 1.1 – Класифікація технологій мікросистем:

ОЕ – оптоелектроніка; ОМ – оптомеханіка; МЕМС – мікроелектромеханічні системи; МОЕМС – мікрооптоелектронномеханічні системи

Класифікація пристроїв МСТ є достатньо об'ємною та, наразі, неусталеною. Це пов'язано з великою кількістю можливих застосувань, появою нових пристроїв та їхнім використанням у нових галузях. Пристрої МСТ можна класифікувати за призначенням, за розмірами, за принципами роботи, за конструктивно-технологічним виконанням, за ступенем функціональності, за вхідною величиною та видом вихідного сигналу (впливу) тощо, рис.1.2.

У загальному випадку в складі МЕМС можна виділити наступні складові (рис.1.3): джерела енергії та передачі руху – активатори (актуатори); електронні підсистеми, що інтегровані на одному кремнієвому чипі – системи на кристалі: мікропроцесори, запам'ятовуючі пристрої, мікроконтролери; сенсори; об'ємні електрорадіоелементи з керованими параметрами; систему внутрішніх та зовнішніх з'єднань; телекомунікаційні зв'язки.

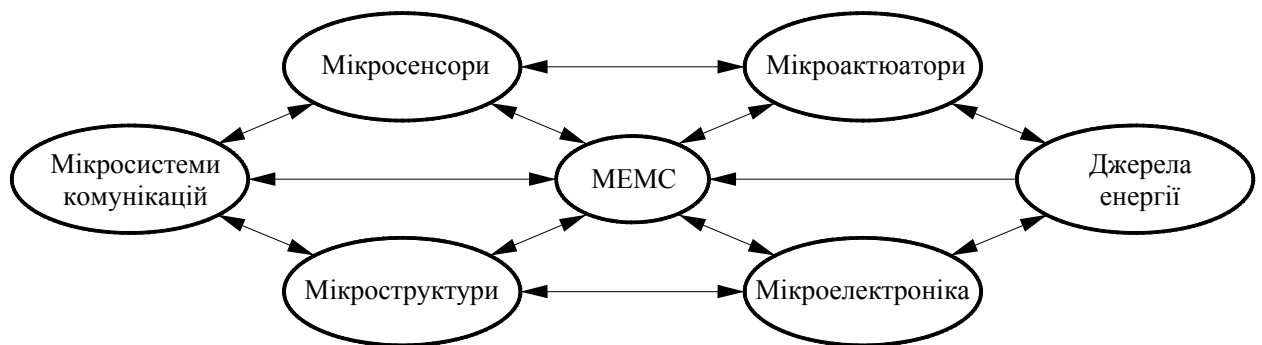


Рисунок 1.3 – Узагальнений склад МЕМС

Як приклад, на рис.1.4 наведено функціональну схему МЕМС, що виконує роль автоматизованого керованого комплексу в системі збирання даних.

MEMS складається з низки елементів, які призначені для виконання більше ніж однієї функції. Кожна система використовує для свого функціонування різні фізичні, хімічні та/або біологічні ефекти (електромагнітні, оптичні, механічні, молекулярно-квантові, мезаскопічні, тощо) [69] – [72].

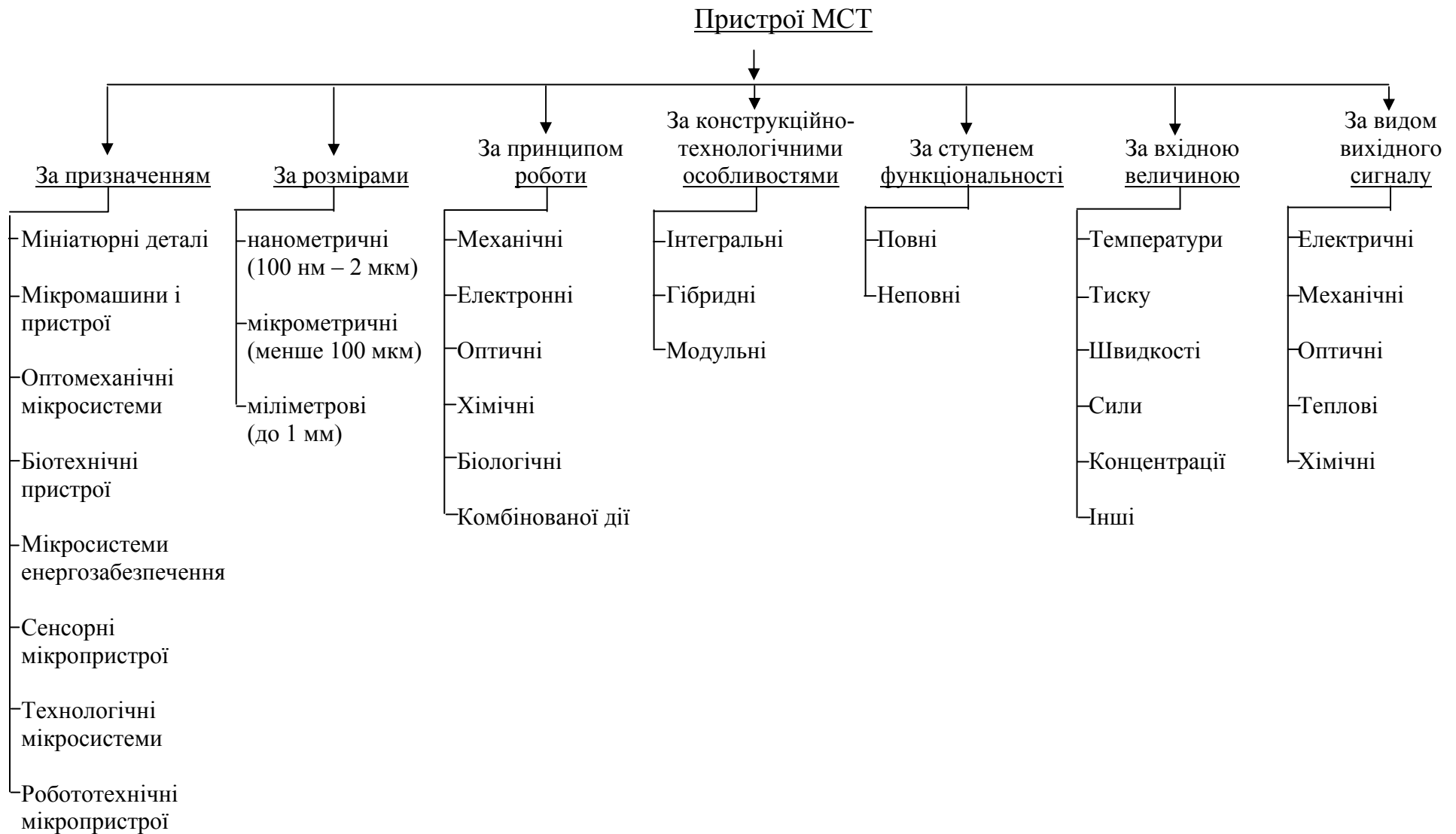


Рисунок 1.2 – Класифікація пристроїв МСТ

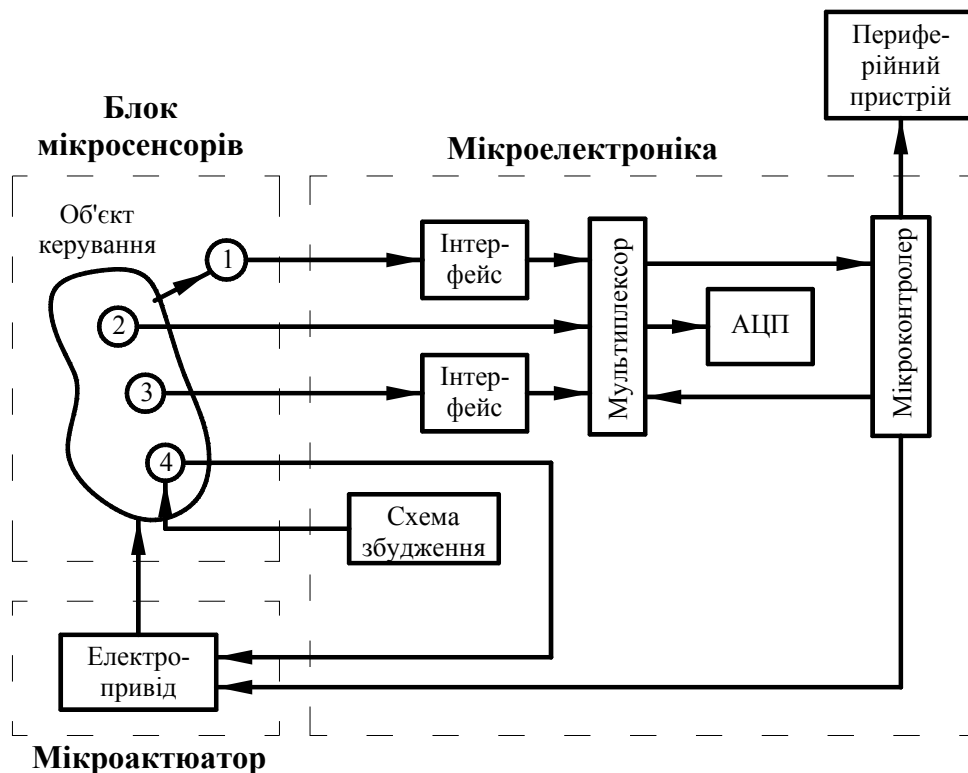


Рисунок 1.4 – Структурна схема МЕМС, призначеної для збирання даних:

1 – безконтактний давач; 2, 3 – активні давачі; 4 – пасивний давач

Пакет сенсорів або мікродавачів виявляє зміни в середовищі системи шляхом вимірювання інформації або явищ, рис.1.5.

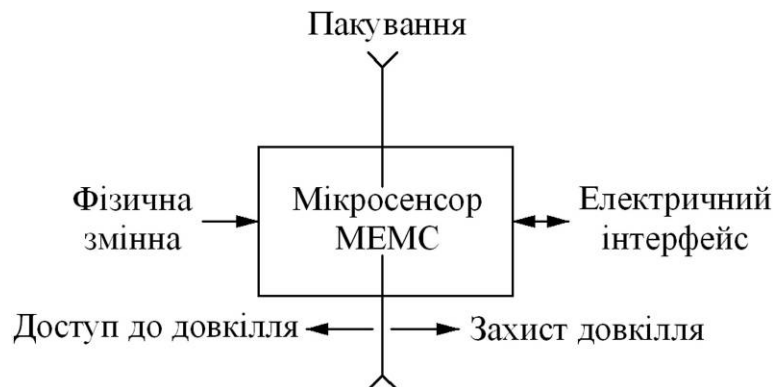


Рисунок 1.5 – Схематичне зображення внутрішніх та зовнішніх зв'язків в пакеті мікросенсорів

Не дивлячись на те, що не існує загального підходу до формування пакету мікросенсорів, останній повинен дотримуватися наступних вимог: забезпечити захист всієї системи і бути досить міцним, щоб витримати дію

робочих середовищ; забезпечити доступ до оточуючого середовища і підключення до фізичної області (оптичні волокна, рідинні лінії подачі тощо); мінімізувати електричні ефекти перешкод всередині та зовні пристрою; розсіювати тепло, що генерується і витримувати високі робочі температури (в разі необхідності); мінімізувати механічні напруження від зовнішнього навантаження. Для цього переважно використовуються ємнісні, п'єзоелектричні, тензорезистивні, терморезистивні, фотоелектричні сенсори, сенсори на ефекті Хола та поверхневого плазмонного резонансу [73], [74].

Електронна підсистема МСТ – це інтелектуальні пристрої, які реалізуються на базі універсальної та спеціалізованої мікросхематичної бази. Мікроелектроніка обробляє цю інформацію і вимушує мікроактуатори реагувати на них та виконувати певні дії. Система керування використовується для приведення у дію відповідних актуаторів, часто з урахуванням інформації від сенсорів та відповідно до закладених принципів побудови виробів МСТ, а також може виконувати функції інтерфейсу з системою користувача й допоміжні функції щодо забезпечення роботи усієї системи (функції формування певних електричних сигналів, функції самоперевірки, калібрування тощо). Виконавчий механізм (актуатор, мікро- та наноактуатор) – це пристрій, який перетворює енергію у керований рух. Основні методи для отримання активації (рух, деформація, приведення в дію) в таких пристроях можуть бути зведені до таких: електростатичний, магнітний, п'єзоелектричний, гідравлічний, тепловий, а також їхнього поєднання. Найбільш перспективними вважаються п'єзоелектричні та гідравлічні методи активації [75], [76]. Сучасні актуатори включають: мікродвигуни (електростатичні, пьезо-, вібраційні, рідинні і твердотільні реактивні, імпульсної дії), мікродозатори, мікропозиціонери, засоби інтроскопії, неінвазивні засоби вивчення внутрішніх органів і мозку людини, цільової доставки ліків та іншу унікальну медичну апаратуру.

Для виготовлення пристроїв МСТ використовується широка номенклатура матеріалів: різноманітні метали у чистому вигляді та у

сплавах, неметали, мінеральні сполуки та органічні матеріали. Звичайно, намагаються використовувати якомога меншу кількість різнорідних матеріалів, щоби покращити технологічність пристроїв та знизити собівартість продукції. Тому розширення спектра матеріалів прийнятне лише за наявності специфічних вимог до елементів пристрою [77], [78].

Загалом, при створенні мікросистем, фактично, виділяють дві групи матеріалів:

- конструкційні (скло, монокристалічний, полікристалічний, пористий кремній, діоксид та нітрид кремнію, кераміка, полімери, вольфрам, нікель, мідь, золото, алмазоподібний вуглець), що використовуються для формування конструкційних елементів, струмопроводів, мастила.

- функціональні (нікель / титан, пермалой, кварц, оксид цинку, п'єзо- та сегнетокераміка, матеріали групи A_3B_5 , A_4B_6), що виконують функції: джерел руху; механізмів передачі руху; сенсорних і активуючих середовищ, які проявляються за рахунок електростатичних, електромеханічних, п'єзоелектричних, магнітних, оптичних явищ та ефекту пам'яті форми.

При створенні мікросистем різного функціонального призначення на основі композицій різних матеріалів повинні враховуватися наступні параметри: кристалохімічна сумісність, термомеханічна сумісність, теплова стійкість, електрична стійкість, механічна стійкість, механічна втома.

В процесі виготовлення мікросистем головним чином використовується групова технологія, що усуває ручне втручання.

Мікросистеми мають малі розміри, а тому і витрати на матеріали незначні, а це означає, що виробничі витрати низькі, незважаючи на те, що накладаються особливі вимоги на необхідну чистоту матеріалів. Проте вартість виробництва пристроїв МСТ висока, оскільки виробниче обладнання вимагає надвисоку точність, складне обслуговування та прецизійний контроль за технологічним процесом.

Загалом, основні технології виготовлення компонентів МСТ, а також їх приклади наведено в табл.1.1.

Таблиця 1.1 – Основні технології виготовлення компонентів МСТ

Назва технології	Основні процеси, що лежать в основі технології	Основні оброблювані матеріали	Товщина оброблюваного матеріалу	Приклад виробу, що виготовляється за даною технологією
Масова мікрообробка	Механічні, хімічні	Кремній	Більше 100 мкм	 <p>Мікропристрій для уловлювання еритроцитів</p>
Об'ємна мікрообробка	Хімічні	Кремній	Більше 100 мкм	 <p>Датчик тиску</p>
Поверхнева мікрообробка	Механічні, хімічні	Кремній, двоокис кремнію	до 2 мкм	 <p>Мікротор</p>
LIGA технологія	Механічні, хімічні, променеві	Метали, полімери, кераміка, скло	10 мкм – 10 мм	 <p>Висока шестерня</p>
HAR технологія	Хімічні, корпускулярні	Кремній	10 мкм – 100 мкм	 <p>“Лабораторія на чіпі”</p>
Інтегровані технології	Механічні, хімічні, променеві, корпускулярні, квантові	Кремній, нітрид кремнію	До 100 мкм	 <p>Масив мікродзеркал</p>

В цілому, технологія виготовлення компонентів МСТ полягає в наступному. Насамперед, на кремнієву підкладку – основу для пристроїв мікроелектроніки, наноситься шар ізолятора. Як варіант, замість кремнію з ізолятором може використовуватися скляна або навіть пластмасова підкладка, яка має бути електрично нейтральною. Після цього наноситься шар металу для виготовлення електродів, який покривається фоторезистом.

Наступний етап – літографія. Пропущений через маску ультрафіолет змінює властивості фоторезисту. Та його частина, на яку потрапили промені, стає нестійкою до розчинника і видаляється, оголюючи шар металу. Неприкритий фоторезистом метал витравлюється.

Після видалення вже непотрібного шару фоторезисту на отриману поверхню наноситься шар ізолятора. Процес літографії повторюється для шару ізолятора, утворюючи в останньому акуратні поглиблення, в яких розташовуються електроди та інші електронні та механічні елементи МСТ.

Подальше виготовлення пристрою зводиться до пошарового нарощування компонентів МСТ на підготовлену підкладку. В цілому, виготовлення виробу МСТ за рівнем складності та інтеграції можуть складатися від двох (2L-технологія) до п'яти шарів (5L-технологія), рис.1.6.

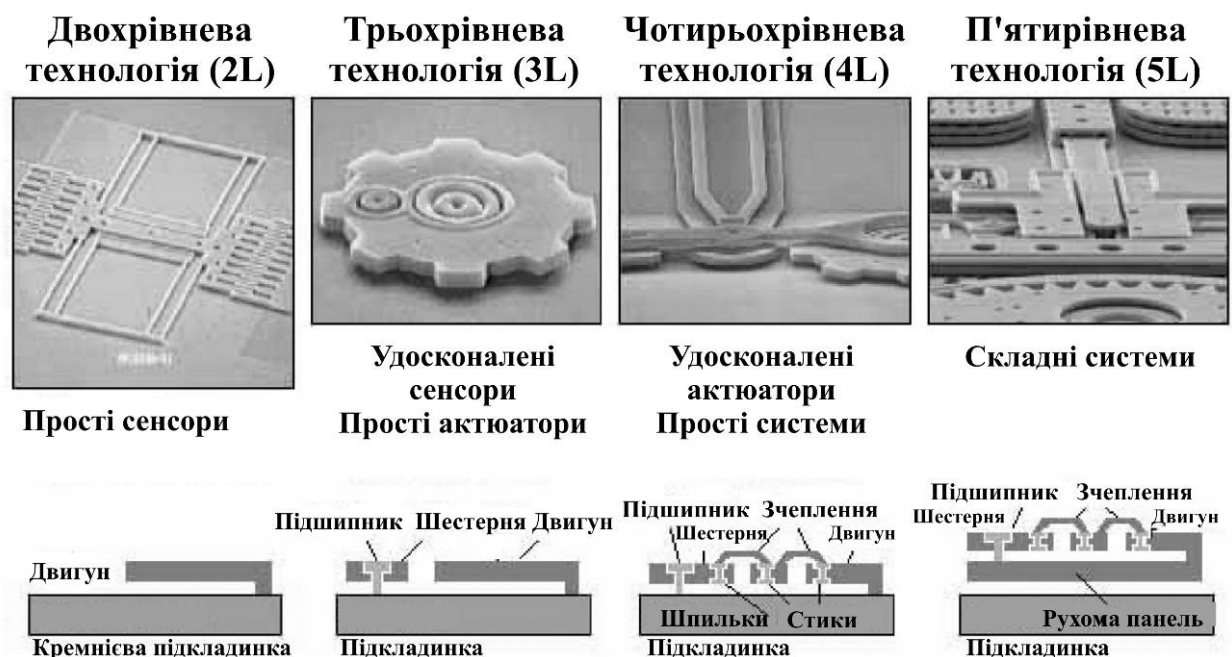


Рисунок 1.6 – Приклади різних за рівнем складності та інтеграції компонентів МСТ

Як і в мікроелектроніці, пристрої виготовляються не окремо, а досить великими пластинами, які в кінці процесу розрізають на окремі чипи і упаковуються в корпуси з пластику, кераміки або інших матеріалів, рис.1.7.

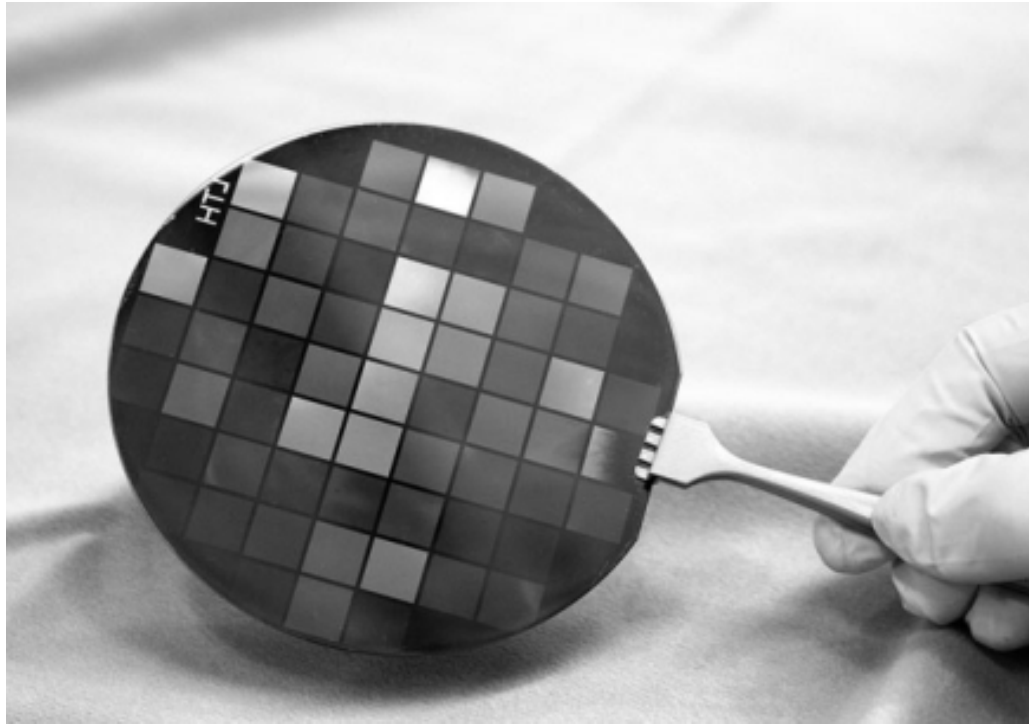


Рисунок 1.7 – Чотиридюймова пластина МСТ,
виготовлена компанією Advanced Diamonds Technologies [79]

Пристрої МСТ знаходять широке застосування в різноманітних галузях промисловості. При цьому, на відміну від макропристроїв, що знайшли застосування в певних областях техніки та технології і є достатньо унікальними, що унеможлиблює їхню уніфікацію, ідентичні компоненти МСТ можуть використовуватися в різноманітних галузях. Наприклад, прототип друкуючої голівки струменевого принтеру, що широко використовується на сьогодні, раніше використовувався як пристрій, застосовуваний в процесі поділу атомних ядер. Так, в таблиці 1.2 наводяться приклади застосування аналогічних за принципом дії та конструкцією МСТ пристроїв у різних галузях.

Таблиця 1.2 – Приклади аналогічних МСТ пристроїв, що знаходять застосування у різних галузях

Автомобільна промисло-вість	Приладо-будування	Медицина	Комунікаційні технології	Оборонна промисло-вість
Система подачі рідкого матеріалу у 3D-принтерах	Голівки струменевих принтерів	Мікротитра-ційні планшети	—	—
Датчики рівня палива та тиску пари	Датчики тиску	Датчики вимірювання кров'яного тиску	—	Датчики тиску в авіоніці
Системи збереження даних	Системи збереження даних	—	Системи збереження даних	Системи збереження даних
Проекційні екрани	Проекційні дисплеї в контрольно-вимірювальних приладах	Проекційні дисплеї для медичних досліджень та хірургічних втручань	Проекційні дисплеї в портативних пристроях зв'язку	Проекційні екрани
Датчики подушок безпеки	Датчики землетрусу	—	Вібродатчики для волоконно-оптичних мереж	Вбудовані вібродатчики
Навігаційні датчики	Навігаційні датчики	—	Системи позиціону-вання супутникових засобів зв'язку	Системи наведення боеприпасів
Інтелекту-альні шини керування	Інтелектуальні системи вимірювання	Системи доставки лікарських засобів	—	Системи керування БПЛА

Загалом, враховуючи, що усі пристрої МСТ за основним функціональним призначенням можна поділити на давачі та актуатори, складена схема застосування таких пристроїв, рис.1.8 [80] – [85].



Рисунок 1.8. – Застосування пристроїв МСТ
різного функціонального призначення

Згідно статистичних даних [86] розвиток MEMS у 2018 році мав наступний вигляд рис. 1.9.

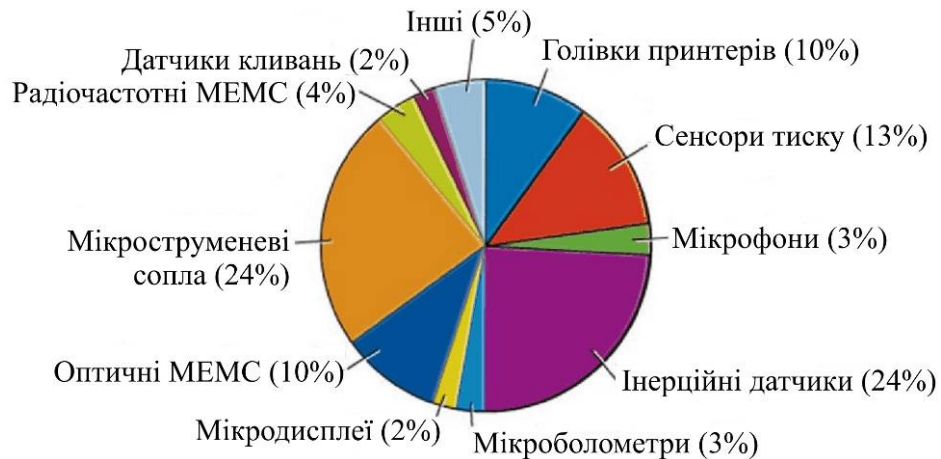


Рисунок 1.9 – Поширення пристроїв MEMS у світі станом на 2018 рік

За результатами аналізу світового ринку пристроїв MEMS консалтинговою компанією “Yole Développement” (Франція) було встановлено, що на сьогоднішній момент, цей ринок майже досяг відмітки

13 млрд. дол. США, а вже до 2021 року – складатиме близько 20 млрд. дол. США [32]. При цьому, на початку періоду дослідження ринку пристроїв MEMS у 2006 році, останній складав 5,9 млрд. дол. США, що вказує на зростання ринку в середньому на 9% в період з 2006 по 2011 роки та різке збільшення рівня зростання на 13% в період з 2011 по 2021 роки [87], рис.1.10.

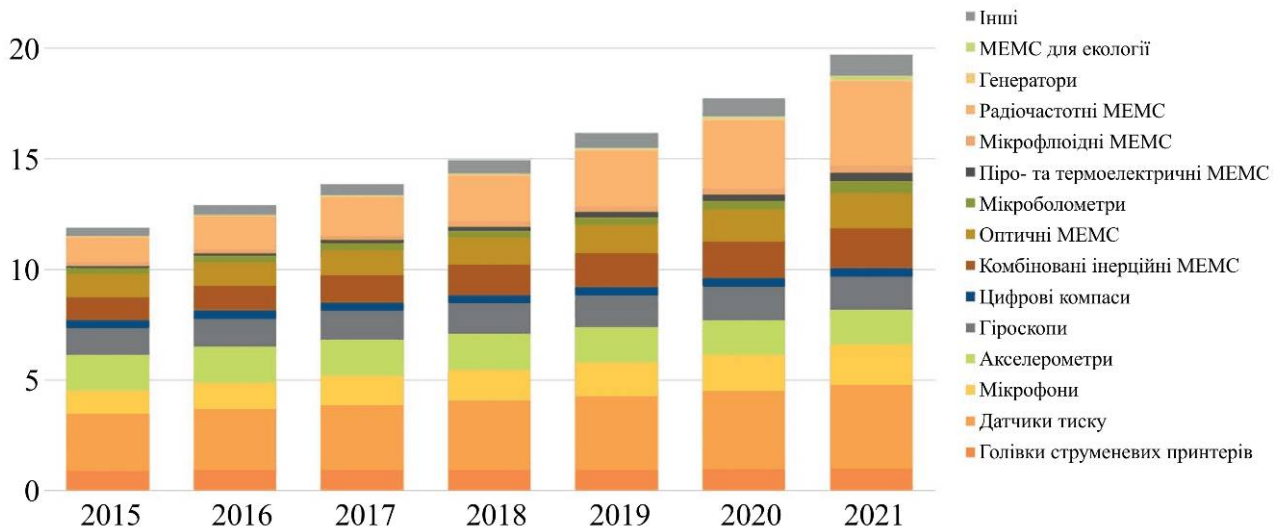


Рисунок 1.10 – Прогнозування світового ринку пристроїв MEMS
(у млрд. дол. США) за період 2015-2021 роки

Таке збільшення ринку пристроїв MEMS пов'язане зі зростанням попиту на них, різке збільшення обсягів виробництва та, в свою чергу, веде до значного зменшення собівартості цих пристроїв. Так, наприклад, типовий оптичний перемикач компанії “Agere Systems” (раніше відомий як підрозділ мікроелектроніки “Lucent Technologies”) [88], що є однією з провідних світових компаній в галузі виробництва пристроїв MEMS, у 2007 році коштував більше однієї тис. дол. США, але вже у 2015 році, аналогічний пристрій при тому же рівні функціональності мав вартість близько одного дол. США.

Враховуючи вищенаведене та надзвичайно швидкий рівень росту технологій, можна з впевненістю сказати, що сама галузь МСТ має значні перспективи розвитку та розширення на тривалий період.

Проте, не дивлячись на усі можливості та функціональні спроможності сучасних МСТ основними проблемами залишається розробка нових ефективних технологій формування об'ємних структур з різних матеріалів з урахуванням того факту, що сучасні пристрої МСТ містять, як електронні, так і механічні компоненти мікро- та нанометричних розмірів.

Слід відмітити, що саме точність виготовлення та якість (дотримання хімічного складу, однорідність фізичних властивостей, наявність на поверхні та в об'ємі матеріалу мікро- та макродефектів, тощо) використовуваних матеріалів дозволяють створювати пристрої МСТ з унікальними функціональними можливостями [89] – [91]: частотою обробки сигналів – до ТераГерц, робочою частотою обертання рухливих елементів – до сотень КілоГерц, часом безвідмовної роботи пристрою – десятки та сотні тисяч годин.

Така специфіка роботи вимагає дотримання більш суворих вимог до контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ при їх виготовленні та експлуатації, аніж до традиційних пристроїв. Не дотримання цих вимог веде до введення в експлуатацію бракованих компонентів МСТ, некоректна робота яких призводить до неправильної інтерпретації результатів отримання та обробки інформації з сенсорів, помилкової реакції пристрою на зовнішній фактор, передчасного виходу із ладу пристрою, а також збільшення часу на ремонтні та профілактичні зупинки систем, до складу яких входять ці пристрої. Це, в свою чергу, збільшує частку виробів, які підлягають періодичному ремонту та заміні, значному зменшенню терміну їх експлуатації, чим зменшує економічну привабливість виробів МСТ в цілому.

Основні вимоги до компонентів МСТ. До сучасних компонентів МСТ пред'являють дедалі більш складні, нерідко взаємовиключні вимоги [92]: багатфункціональність, щільність компонування, мінімальні габарити і маса, можливість високопродуктивного складення, висока надійність та довготривалість експлуатації при різних (у тому числі, екстремальних) режимах та в різноманітних середовищах (біологічних, корозійних,

агресивних). При цьому необхідно забезпечити високий рівень вихідних параметрів та дедалі більший діапазоні робочих режимів, герметичність, стійкість виробів до впливу вібраційних та ударних навантажень.

Виготовлені пристрої повинні мати високу якість і надійність при впливі на них різних фізико-механічних та кліматичних факторів (ударів, вібрації, підвищених та знижених температур і тиску, підвищеної вологості та впливу іонізуючих випромінювань), а також електричного навантаження. При цьому основними вимогами, які пред'являють до контрольно-вимірювального обладнання є висока точність, достовірність, надійність і відтворюваність результатів.

Висока точність обумовлена досить жорсткими нормами на контрольовані величини (струми, напруги, час), а також дуже вузькими діапазонами їх визначення. Так, вхідні струми деяких пристроїв МСТ складають одиниці наноампер, час затримки поширення сигналу – одиниці мікросекунд при нормах на ці параметри того ж порядку.

Висока вірогідність результатів контролю забезпечує оцінку придатності виробів до експлуатації без ризику появи відмов, дозволяє своєчасно виявляти дефектні вироби і вносити корективи в технологію їх виготовлення або конструкцію.

За показник надійності пристроїв МСТ часто приймають гарантований час безвідмовної роботи. У більшості випадків цей час складає не менше 10^4 годин. Вважається, що ймовірність безвідмовної роботи має становитися 0,999 [93]. Отже, частота відмов таких елементів є величиною порядку 10^{-7} – 10^{-8} рік⁻¹.

Висока надійність МСТ забезпечується високою чистотою вихідних матеріалів [94], їх фізико-хімічною сумісністю, точністю їх виготовлення та узгодженості, суворим контролем параметрів технологічного процесу виготовлення, а також мінімальним використанням ручної праці.

При цьому, якщо питання дотримання хімічного складу вирішується технологічно на етапах вирощування монокристалів, їх збагачення, або

фізико-хімічної обробки матеріалів, то дотримання суцільної однорідності фізичних (особливо механічних) властивостей та повної відсутності на поверхні та в об'ємі матеріалу мікро- та макродефектів досі залишається питанням невирішеним. Особливо це стосується тих пристроїв МСТ, специфіка роботи яких полягає у рухомій дії (мікроприводи, часові механізми, мікрогіроскопи та інше), зміні форми та розмірів окремих компонентів пристроїв (усі пристрої, що працюють за принципами п'єзоелектричного та сегнетоелектричного ефектів) та взаємодії незахищених ділянок пристроїв з оточуючим середовищем (особливо в умовах високого вмісту пилу, вологи, в агресивних та хімічно-активних середовищах).

Висока відтворюваність результатів є найважливішою вимогою, що пред'являється до результатів вимірювання та контролю, і забезпечується при виконанні умов [92]:

- застосуванні перевіреного та атестованого дослідницького обладнання;
- завданні режимів роботи і підтримці їх в точній відповідності з технічною документацією та умовами проведення випробувань;
- дотриманні умов до оточуючого середовища при проведенні контролю (температури, вологості та ін.).

Таким чином, виникає необхідність високоточного, надійного, швидкого та ефективного комплексного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ, а також визначення терміну їх експлуатації шляхом розроблення надійної та ефективної інструментальної, апаратно-методичної бази та застосування сучасних інформаційно-аналітичних засобів.

1.2. Аналіз сучасних методів неруйнівного контролю поверхонь компонентів мікросистемної техніки

Відомо [95] – [97], що механічні властивості матеріалів в надмалих

об'ємах (нанорозмірні кластери, нанопокриття, нанокомпозити) істотно відрізняються від довідкових значень, отриманих при випробуванні матеріалів в макрооб'ємах. У зв'язку з цим виникає гостра необхідність у залученні нових та удосконаленні існуючих аналітично-експериментальних методів вимірювання та контролю характеристик компонентів МСТ.

Методи мікро- та нанометричного дослідження стану поверхні та механічних характеристик компонентів МСТ представлені на рис.1.11 і поділяються на наступні три групи: для дослідження тільки стану і морфології поверхні, а також поверхневих характеристик об'єкту; для дослідження об'єкту тільки по глибині; для дослідження усього об'єкту – по поверхні та по глибині.

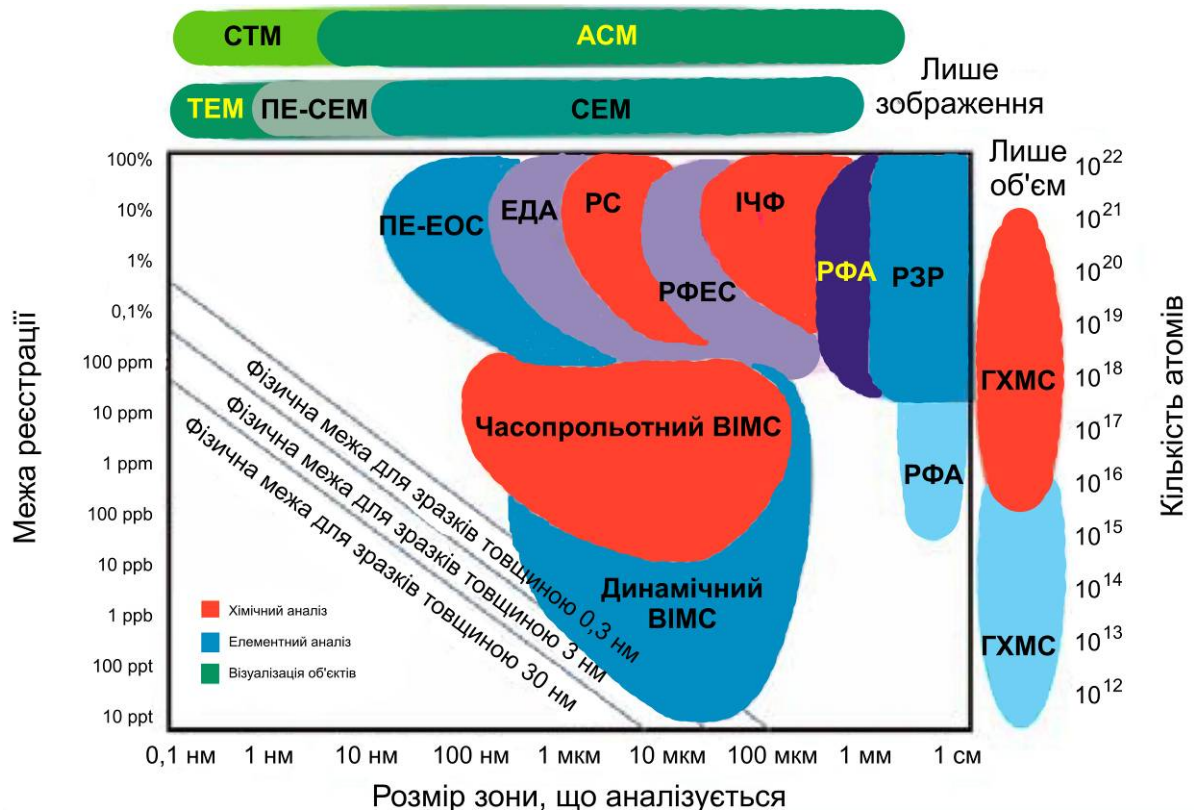


Рисунок 1.11 – Аналітичні можливості сучасних методів дослідження характеристик компонентів МСТ.

Пояснення до рис.1.11: СТМ – скануюча тунельна мікроскопія; АСМ – атомно-силова мікроскопія; ТЕМ – електронна мікроскопія, що працює на просвітлення; ПЕ-СЕМ – скануюча електронна мікроскопія з польової емісії; СЕМ – скануюча електронна мікроскопія; ПЕ-ЕОС – електронна

Оже-спектроскопія з польовою емісією; ЕДА – енергодисперсійний аналіз; РС – Рамановська спектроскопія; РФЕС – рентгенівська фотоелектронна спектроскопія; ІЧФ – інфрачервона спектроскопія; РЗР – Резерфордівське зворотне розсіювання; РФА – рентгенофазовий аналіз; ВІМС – вторинна іонна мас-спектрометрія; ГХМС – газова хроматографічна мас-спектрометрія

На діаграмі (рис.1.11) не відокремлені поверхнево чутливі методи, оскільки вони складають загальний ряд аналітичних підходів. Проте, можна відзначити, що для контролю компонентів МСТ найбільш ефективно використовувати саме поверхневі методи, оскільки такі елементи представляють, як правило, 2D-об'єкти, тобто елементи, товщина яких набагато менша за площу поверхні та не перевищує одиниць мікрометрів. Останнє і передбачає перспективним використання саме поверхневих методів, серед яких слід виділити такі групи методів [98] – [100], як: скануюча зондова мікроскопія (СЗМ) та електронна мікроскопія (ЕМ).

Загальною рисою поверхневих методів є можливість проведення досліджень в дуже тонкому поверхневому шарі або покритті, тобто вимірювання в дуже малій кількості речовини. Проте, не дивлячись на можливість використання обох груп методів, останні суттєво різняться, як за принципом дії, так і за їх характеристиками, табл.1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняння групи методів СЗМ та ЕМ

Характеристика	Група методів СЗМ	Група методів ЕМ
– за розмірами ділянки	Локальні	Інтегральні
– за конструктивними особливостями приладів	Контактні, безконтактні	Безконтактні
– за можливістю безпосереднього вимірювання і контролю величини	Абсолютні	Відносні
– за кількістю характеристик	Одиничні	Комплексні
– за однозначним сприйняттям величини	Об'єктивні	Суб'єктивні

Як можна побачити із цієї таблиці, усі методи СЗМ відносяться до таких, що проводять безпосередні дослідження по певним елементарним ділянкам поверхні, як при безпосередньому контакті з нею, так і не контактуючи з поверхнею; при цьому основною величиною в цих методах є значення параметрів рельєфу в точці відносно певного (основного) рівня, яке визначається безпосередньо зондом мікроскопу [101].

На противагу методам СЗМ, усі методи ЕМ проводять дослідження інтегруючи дані з певної ділянки по якій проводяться дослідження [102]. При цьому безпосередній контакт з поверхнею відсутній, потік електронів здійснює лише тепловий та електромагнітний вплив на поверхню не впливаючи на неї фізично. Комплекс параметрів, що отримується даною групою методів, як-то: контрастність, інтенсивність та розподілення електронного потоку по швидкостям та концентрації, вторинні електромагнітні випромінювання та інші, дозволяють визначати мікропрофіль, внутрішні напруження та інші параметри лише після певної обробки, а отриманні дані про геометрію поверхні є більше суб'єктивними і не можуть визначати абсолютне чисельне значення мікронерівностей без порівняння результатів дослідження з еталонним зразком.

В останні роки науково-виробничими організаціями розроблено ряд унікальних методик по визначенню фізико-механічні характеристики поверхонь, як методами ЕМ [102] – [104] так і методами СЗМ [104] – [108], а також проведена поглиблена оптимізація інструментарію для визначення характеристик у мікро- та нанодіапазонах [109] – [118], що відповідає міжнародним стандартам DIN та ISO, із забезпеченням вимог системи якості ISO 9001:2000. Це, в свою чергу, дозволило значно розширити можливості цих методів при контролі не лише геометрії поверхні, але й деяких їх механічних характеристик, табл.1.4.

Таблиця 1.4 - Порівняння методів ЕМ та СЗМ у можливостях дослідження геометричних та механічних характеристик поверхонь МЕМС

Метод дослідження	Максимальна ділянка на якій проводяться дослідження, ммхмм	Максимальне збільшення (роздільна здатність) методу	Робоче середовище	Розмірність зображення	Фізико-механічні характеристики, що можуть бути визначені даним методом	Основні відмінності методу
1	2	3	4	5	6	7
Растрова електронна мікроскопія	100×100	10 ⁶ розд. здатність до 0,4 нм	Вакуум	2D	– внутрішні механічні напруження; – коефіцієнт тертя	<u>Переваги:</u> – мінімальне пошкодження зразків <u>Недоліки:</u> – зразок потребує спеціальної підготовки; – важко досліджувати гладкі поверхні; – низька швидкість контролю; – великий вплив на результат контролю надають: нахил поверхні, ступінь її забруднення, структура мікрогеометрії – прилад складний та дорогий при виготовленні та експлуатації.
Електронна мікроскопія, що працює на просвітлення	10×10	10 ⁷ розд. здатність до 0,1 нм	Вакуум	2D	– товщина плівки та поверхневого шару; – морфологія поверхні; – мікроструктура поверхні	<u>Переваги:</u> – пошкодження зразків відсутнє; – висока роздільна здатність методу <u>Недоліки:</u> – зразок потребує спеціальної підготовки; – досліджується не зразок, а його репліка; – у дослідженні треба дотримуватися високої гладкості поверхні та малої товщини репліки; – прилад складний та дорогий при виготовленні та експлуатації

Продовження табл. 1.4.

1	2	3	4	5	6	7
Скануюча зондова мікроскопія	20×20	10 ⁸ розд. здатність до 0,15 нм	Повітря, рідина, вакуум	2D/3D	<ul style="list-style-type: none"> – товщина плівки; – внутрішні механічні напруження; – коефіцієнт тертя; – мікротвердість; – зносостійкість 	<p><u>Переваги:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – мінімальне пошкодження зразків; – результати дослідження об'єктивні: нахил поверхні, ступінь її забруднення не впливають на достовірність результатів; – висока точність та якість проведення досліджень <p><u>Недоліки:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> – наявність чисельних артефактів нівелює можливість отримання атомарного дозволу; – поступове зношення зонду, поступово зменшує точність досліджень від досліду до досліду

З огляду на дані, наведені в табл.1.4, можна зробити висновок, що серед зазначених методів, найбільш перспективними та функціональними для комплексного дослідження геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ можуть бути застосовані методи скануючої зондової мікроскопії (СЗМ).

1.3. Аналіз методів та засобів скануючої зондової мікроскопії для вимірювання і контролю компонентів мікросистемної техніки

Скануюча зондова мікроскопія об'єднує клас методів дослідження і контролю геометричних та механічних характеристик, що здійснюються за допомогою скануючого механічного вістря (зонду), рис.1.12.

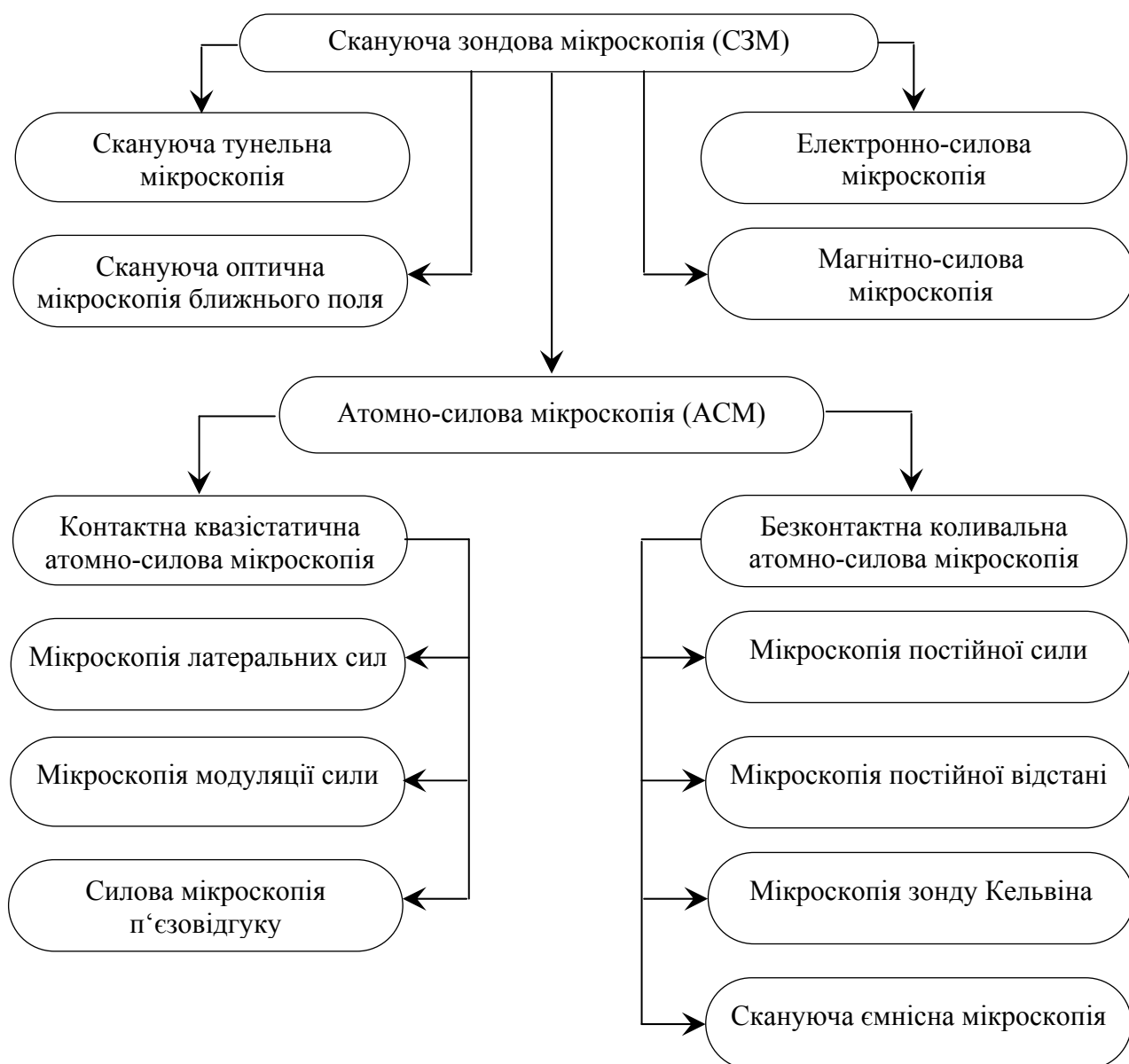


Рисунок 1.12 – Класифікація методів скануючої зондової мікроскопії

Сучасні методи поверхневого аналізу матеріалів, можливості яких відкриває скануюча зондова мікроскопія дозволяють не лише високоточно відновлювати топограму досліджуваної поверхні, але й проводити картографування фізико-механічних властивостей матеріалів з високим ступенем локалізації результатів дослідження, аж до кількох ангстремів як у вертикальному, так і в латеральному напрямках. В той же час, вигнута мікроконсоль зонду може служити пружним навантажувальним елементом, здатним реалізовувати механічні зусилля на поверхню в широкому діапазоні: від наноньютонів при взаємодії вістря з поверхнею зразка в процесі її

топографування до міліньютонів при наноіндентуванні або склерометрії.

Межі можливостей методів СЗМ при топографічних вимірюваннях представлені на рис.1.13.

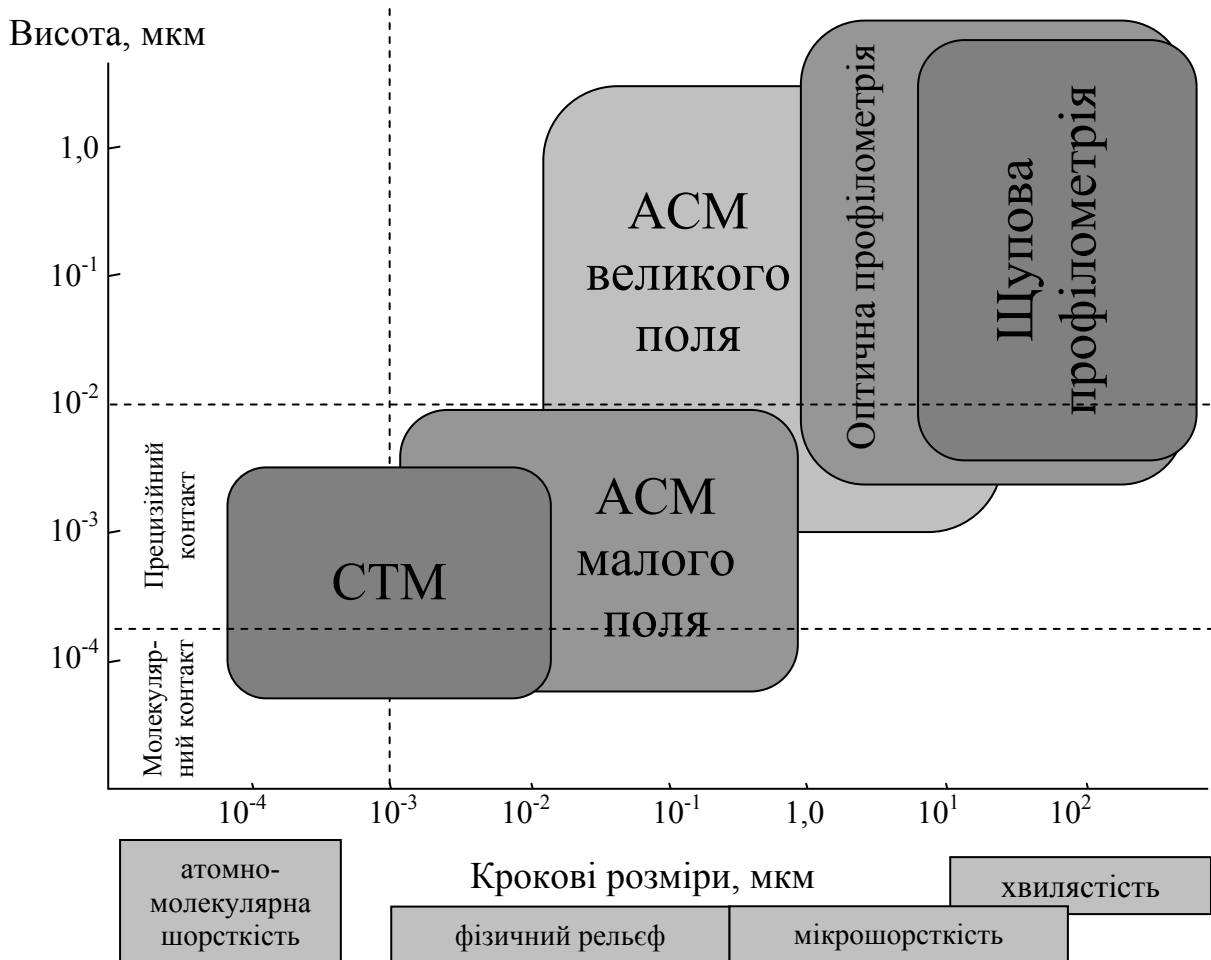


Рисунок 1.13 – Масштабні рівні геометричних відхилень поверхонь, методи СЗМ вимірювань топограми та рівні механіки контакту

Як можна побачити на рис.1.12 – 1.13, основну групу методів СЗМ складають методи атомно-силової мікроскопії (АСМ), які на відміну від інших методів СЗМ дозволяють точно та якісно визначати не лише мікронерівності поверхні, але й їх механічні характеристики, такі, як: мікротвердість, зносостійкість, внутрішні механічні напруження, коефіцієнт тертя, модуль пружності тощо. При цьому, дослідження за допомогою методу АСМ можуть проводитися у будь-якому середовищі (рідкому, газовому або вакуумі), а в якості досліджуваних матеріалів можуть виступати

різноманітні по твердості, пружності та електропровідності матеріали [119] – [121]: напівпровідники, метали, полімери, біологічні об'єкти (клітини, формові елементи крові, білки, віруси тощо). Останні, на відміну від методів ЕМ, можуть досліджуватися як у вигляді реплік, так і безпосередньо у реакторі – в якості об'єктів, що проявляють функції життєдіяльності в природному для них середовищі.

Таким чином, враховуючи вищеперераховані переваги методу АСМ, для вимірювання і контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ доцільно використовувати саме метод АСМ, функціональна схема якого наведена на рис.1.14 [122], а основні параметри методу – в таблиці 1.5.

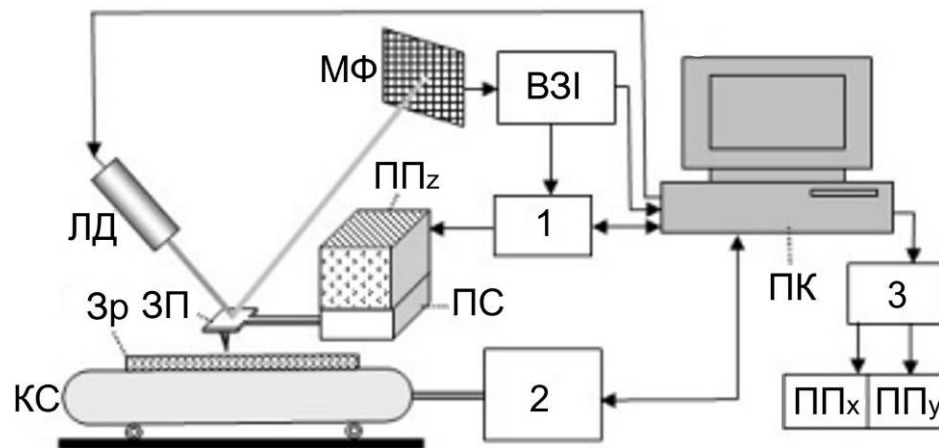
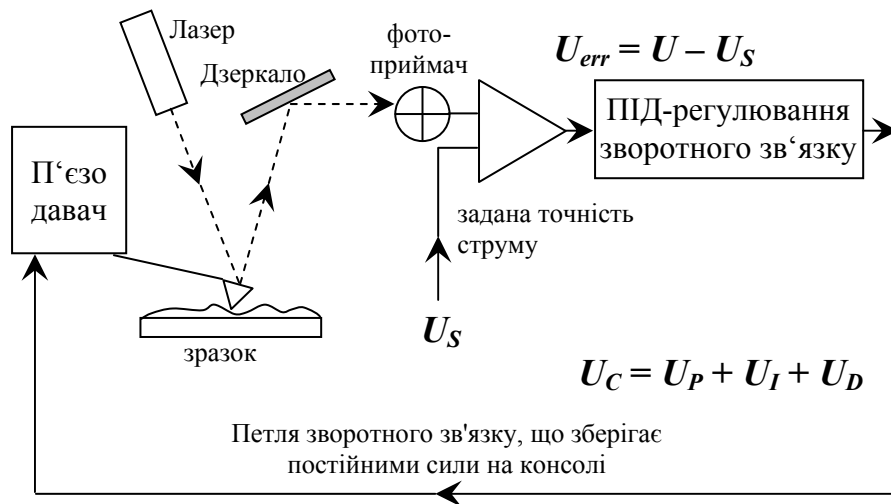


Рисунок 1.14 – Структурна схема АСМ: 1 – електрична схема прийому сигналу з п'єзоелектричного детектору; 2, 3 – відповідно, електронні вузли керування координатним столом (КС) зі зразком (Зр) та п'єзоелектричних приводів подачі зразка вздовж поверхні (ПП_x, ПП_y); ПК – керуючий комп'ютер, ВЗІ – електронний вузол знімання інформації з матричного фотоприймача МФ; ЛД – лазерний діод позиціонування консолі (кантилевера) із зондом відносно поверхні зразка; ПС – п'єзосенсор з кантилевером на кінці якого знаходиться зонд, що кріпиться до кантилеверу і має дзеркальне покриття (ЗП) на тильній стороні; ПП_z – п'єзопривід подачі зонда до поверхні зразка.

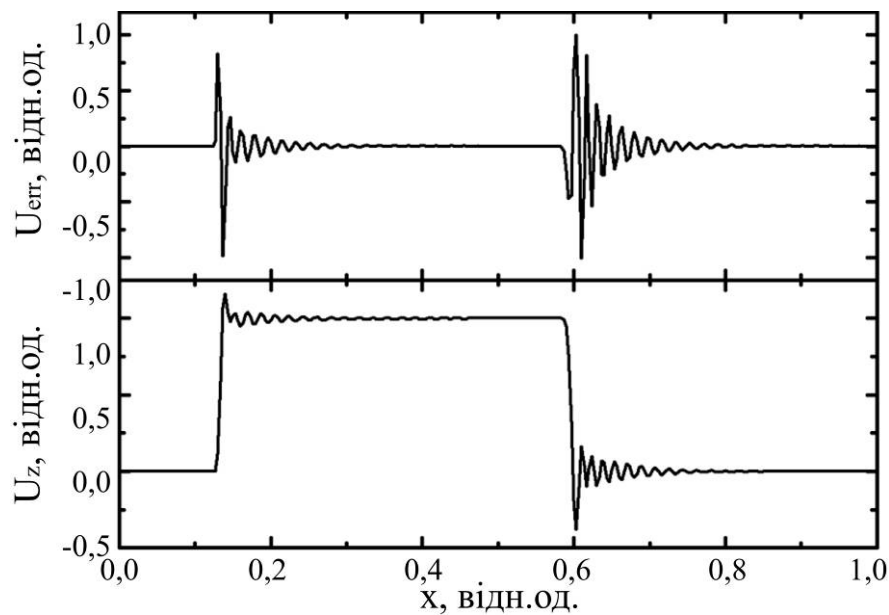
Таблиця 1.5 – Основні параметри методу АСМ

Параметр	Значення
Діапазон визначення лінійних розмірів в площині ХУ, мкм	0 – 90
Діапазон визначення лінійних розмірів по осі Z, мкм	0 – 10
Межі допустимої відносної похибки визначення лінійних розмірів в площині ХУ не більше, %	± 1
Межі допустимої відносної похибки визначення лінійних розмірів по осі Z не більше, %	± 5
Межі допустимої абсолютної похибки порівняння геометричних розмірів в режимі компаратора (при номінальних розмірах більше 10 нм), нм	$\pm (1 + 0,001 L)$
Кут між осями сканування X та Y, градус	$90,0 \pm 1,5$
Кут між віссю Z і нормаллю до площини ХУ не більше, градус	5
Нелінійність сканування в площині ХУ не більше, %	0,5
Неплощинність сканування в площині ХУ не більше, нм	100
Роздільна здатність в площині ХУ не менше, нм	0,15
Роздільна здатність по осі Z не менше, нм	0,1
Дрейф в площині ХУ не більше, нм/с	0,2
Дрейф по осі Z не більше, нм/с	0,15
Максимальна кількість точок сканування по X та Y	4000×4000
Розміри досліджуваних зразків (діаметр×товщина) не більше, мм	100×20

Принцип роботи сучасних АСМ відомий і широко описаний в ряді робіт [123] – [127]. При цьому висока точність та швидкодія методу досягається за рахунок ефективного зворотного зв'язку, реалізованого в пристроях АСМ (рис.1.15) та особливим елементам конструкції, за допомогою яких проводяться дослідження.



а.



б.

Рисунок 1.15 – Схема реалізації зворотного зв'язку в пристроях АСМ (а) та діаграми зміни сигналу помилки і напруги на Z-сканері при дослідженні рельєфу (б)

Зворотній зв'язок в АСМ реалізується за допомогою трьох компонентів керуючого сигналу зворотного зв'язку [128], [129], серед яких:

- пропорційна компонента U_P , яка відповідає за відгук на різкі зміни сигналу помилки U_{err} : $U_P = P \cdot U_{err} = P(U(t) - U_S)$;
- інтегральна компонента U_I – низькочастотний відгук: великі елементи рельєфу, загальний нахил об'єкту дослідження тощо:

$$U_I = I \cdot \int_{t-\tau}^t (U(t) - U_S) dt ;$$

– диференціальна компонента U_D – стабілізація, гасіння небажаних осциляцій: $U_D = D \cdot \frac{d}{dt}(U(t) - U_S)$.

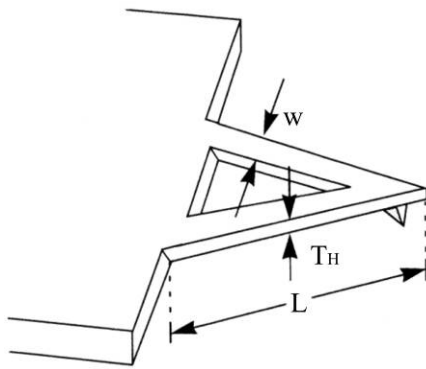
Тут, P , I , D – відповідно, пропорційний, інтегральний та диференціальний коефіцієнти; $(U(t) - U_S)$ – зміни сигналу помилки U_{err} .

Основними елементами конструкції АСМ за допомогою яких проводиться контроль є: зондовий датчик та оптичний сенсор.

Зондовий датчик представляє собою пружний кантилевер (мікроконсоль), що жорстко прикріплена до п'єзодатчика, який служить перетворювачем механічного зусилля, що виникає при згинанні кантилеверу в електричну різницю потенціалів. На вільному кінці консолі може розташовуватися основний елемент пристрою – зонд. Самі зонди, в залежності від режиму роботи АСМ та розв'язуваних завдань поділяються за: коефіцієнтом жорсткості кантилеверу (0,001 – 50 Н/м); радіусом заокруглення вістря (1 – 50 нм), матеріалом зонду (Si, Si₂N₃, металеві та інші покриття, алмаз), а також формою самого зонду (конус, піраміда, кулька або деяка наноструктура).

Зонди, що виготовляються за традиційними технологіями мікроелектроніки мають мініатюрні розміри [130], [131]. Це ускладнює контроль їх розмірів та форми. Єдиним надійним способом контролю параметрів зондів АСМ (особливо форми та радіусу заокруглення вістря) є застосування стандартних тест-зразків та тест-об'єктів [112].

Кантилевери для здійснення контролю методом АСМ поділяються на два типи: V-подібні та I-подібні, схеми та основні характеристики яких наведені на рис.1.16, а також за посиланням [132] – [137].

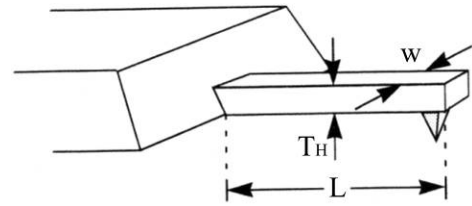


Радіус вістря зонда $r < 50$ нм

Сила взаємодії з поверхнею $F = 5 - 50$ нН

Коеф. жорсткості консолі $k = 0,03 - 0,4$ Н/м

а.



Радіус вістря зонда $r < 20$ нм

Сила взаємодії з поверхнею $F \sim 1$ пН

Коеф. жорсткості консолі $k = 25 - 100$ Н/м

б.

Рисунок 1.16 – Схеми та основні характеристики V-подібної (а) та I-подібної (б) консолі: L , w , T_H – відповідно, довжина, ширина та товщина консолі

Оптичний сенсор (рис.1.17) призначений для визначення ступеню відхилення кантилеверу відносно площини досліджуваного зразка в процесі попереднього підведення зонда до зразка та в процесі сканування поверхні. Як правило, оптичний сенсор представляє собою чотирьохпозиційний фотоприймач, який входить до складу системи позиціонування чутливого елементу на досліджуваній поверхні “лазерний діод – дзеркальне покриття кантилеверу – матричний фотоприймач” (рис.1.14). Відповідний вигин кантилеверу в будь-якій площині веде до зміщення лазерного променя відносно центру фотоприймача, пропорційно змінюючи інтенсивність лазерної плями по секціям фотоприймача. Це і дозволяє опосередковано визначати момент та силу взаємодії зонда з поверхнею, а також коефіцієнт тертя і кут відхилення досліджуваної поверхні від горизонтального положення.

Не дивлячись на те, що принцип роботи АСМ ґрунтується на взаємодії зонду з досліджуваною поверхнею, сам метод має кілька режимів роботи, які відрізняються принципово та дозволяють проводити унікальні дослідження фізико-механічних характеристик поверхні [109].

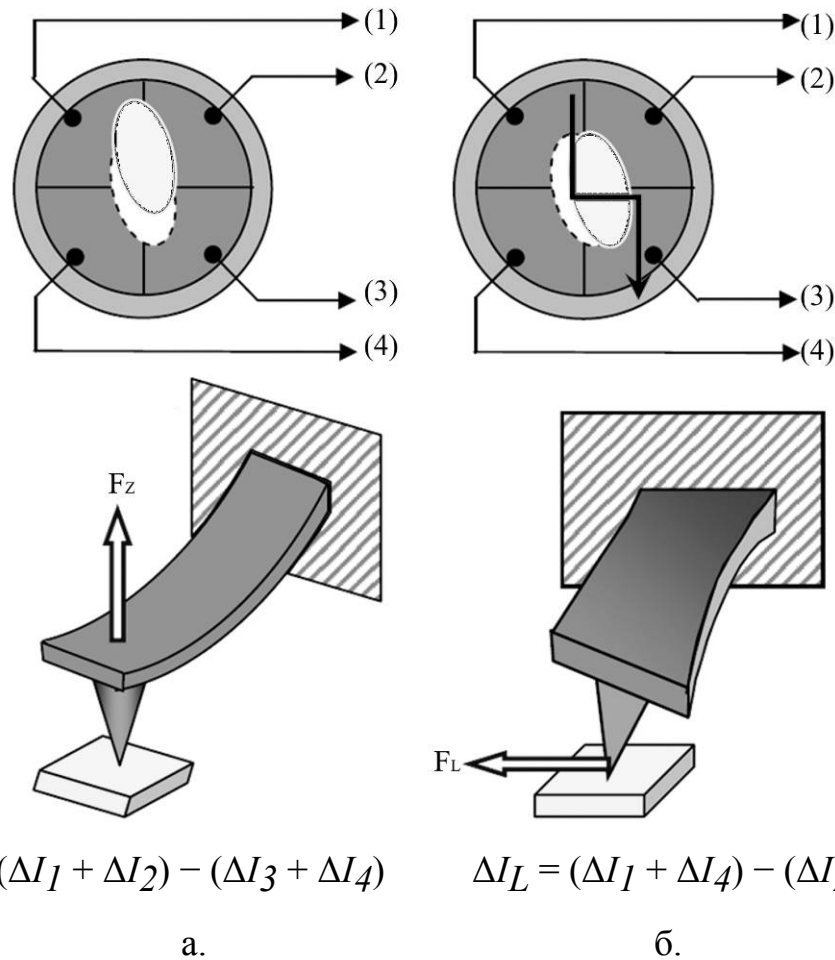


Рисунок 1.17 – Схема відхилення лазерної плями на фотодетекторі при різних варіантах деформування кантилеверу АСМ: а – згинання кантилеверу внаслідок нормальної дії сили згину (F_z) на досліджувану поверхню;

б – кручення кантилеверу внаслідок дії латеральних сил (F_L)

ΔI_z , ΔI_L – зміна фотоструму, що виникає на фотодетекторі внаслідок згину та кручення кантилеверу; $\Delta I_1 - \Delta I_4$ – зміна фотоструму на відповідній секції чотирьохпозиційного фотодетектора

Контактний (статистичний) режим роботи. При контактному режимі, або режимі відштовхування, вістря зонда підходить до досліджуваного зразка на відстань 0,5 – 2 нм, де між ним та досліджуваною поверхнею під дією сил Ван-дер-Ваальса відбувається фізичний контакт. При цьому сила відштовхування врівноважується силою пружності консолі та капілярної силою, яка виникає, якщо контроль проводять на повітрі: зонд

“протикає” тонкий шар вологи, який адсорбується на зразку. Константа пружності консолі в цьому режимі достатньо мала, для того щоб при визначенні профілю поверхні, зонд не руйнував її.

Геометрія досліджуваної поверхні визначається, як правило, або в режимі постійної висоти, або в режимі постійної сили. У першому випадку кантилевер переміщується в горизонтальній площині, при цьому реєструються всі його відхилення. У другому випадку за допомогою системи зворотних зв'язків постійним підтримується відхилення (прогин) кантилевера, тобто сила його взаємодії зі зразком.

Переваги режиму: можливість сканування поверхні з високою швидкістю; можливість сканування зразків з сильними вертикальними змінами топографії; можливість досягнення атомарного дозволу досліджуваної поверхні; максимальна серед усіх режимів АСМ перешкодостійкість.

Недоліки режиму: при постійному контакті зонда з поверхнею та їх відносному русі виникають сили тертя, що ведуть до швидкого зношування зонду; дія латеральних сил по поверхні при дослідженнях, що проводяться на повітрі можуть привести до фізичного порушення структури м'яких зразків (біологічних об'єктів, органічних структур та полімерів тощо).

Напівконтактний режим роботи. Напівконтактний режим або режим переривчастого контакту або “tapping mode” – у такому режимі здійснюються вимушені механічні коливання кантилевера з частотою, близькою до резонансної (як правило, це десятки та сотні кілогерц) і з амплітудою близько 100 нм; в нижній точці коливачів вістря “торкається” поверхні зразка. При пересуванні скануючої голки (або зразка) відстежується зміна резонансної амплітуди кантилевера (залежить від зовнішньої сили). Використовується даний режим, в основному, при дослідженні м'яких матеріалів, таких як полімери та різні біологічні об'єкти.

Переваги режиму: висока роздільна здатність при спостереженні об'єктів зі зниженою механічною жорсткістю (біологічних об'єктів,

органічних структур та полімерів тощо); максимальне уникнення фізичного контакту з поверхнею зменшує затуплення та руйнування зонду до мінімуму; повне виключення латеральних сил та сил тертя дозволяє підвищити якість одержуваного зображення та спрощує інтерпретацію одержуваних зображень.

Недоліки режиму: максимальна швидкість сканування найменша серед усіх режимів АСМ.

Безконтактний (динамічний) режим роботи. При роботі в безконтактному режимі п'єзовібратором збуджуються коливання зонда на деякій частоті (найчастіше, резонансній). Сила міжмолекулярної взаємодії, що діє з боку поверхні, призводить до зрушення амплітудно-частотної та фазово-частотної характеристик зонда, при цьому і амплітуда і фаза змінюють свої значення. Система зворотного зв'язку підтримує постійним значення амплітуди коливань зонда. При цьому АСМ фіксується зміна частоти та фази коливань зонду в кожній точці.

Переваги режиму наступні: отримання атомарної роздільної здатності (лише за умов вакууму); відсутність фізичного контакту мінімізує затуплення та руйнування зонду.

Недоліки режиму: високочутливий до дії зовнішніх факторів (особливо вібрацій та акустичних шумів); забруднення кантилеверу або зонду частинками стороннього матеріалу під час сканування змінює частотні характеристики системи детектування, що призводить до помилкових результатів сканування.

Враховуючи особливості кожного із вищеперерахованих режимів, на рис.1.18 наведені основні методики дослідження поверхні та механічних характеристик компонентів МСТ, що проводяться методом АСМ.

При механічних дослідженнях методом АСМ вістрям зонду здійснюється локальний фізичний контакт з поверхнею зразка, що веде до її руйнування. Таким чином реалізуються наступні методики [138] – [143]: силова спектроскопія в точці, нанотрибометрія та наноіндентування.

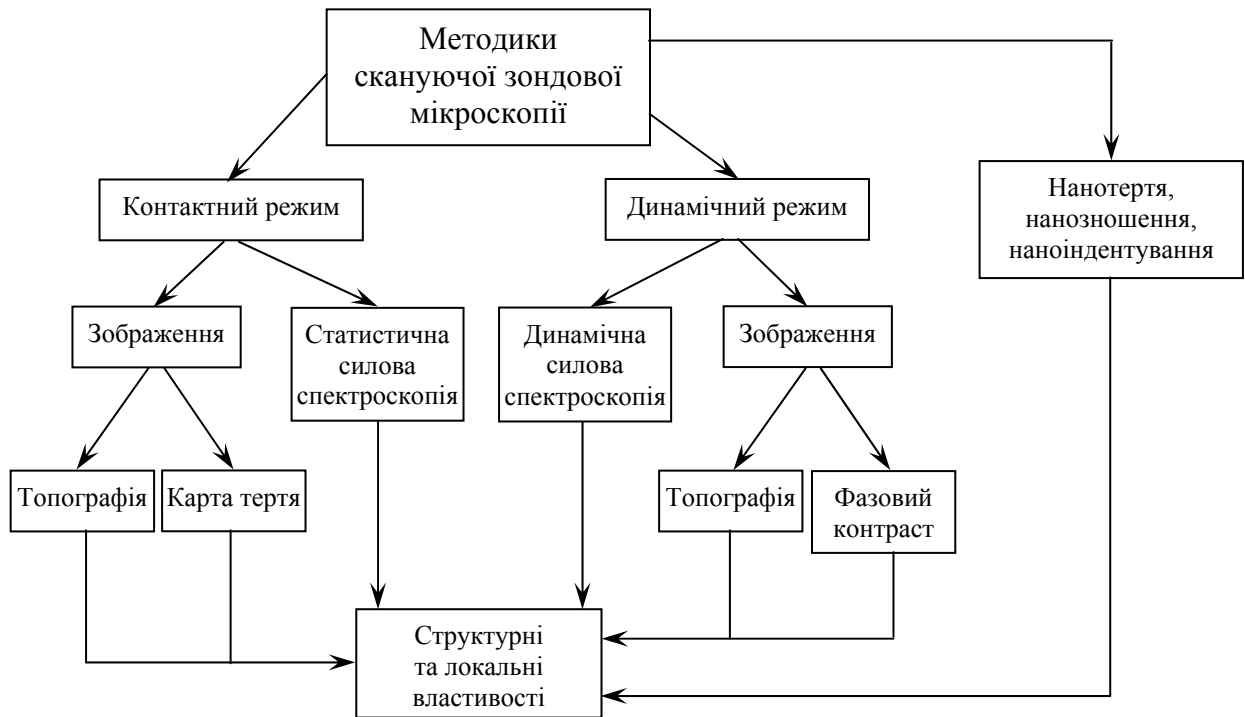


Рисунок 1.18 – Методики АСМ для дослідження поверхні та механічних характеристик компонентів МСТ

Майже в усіх АСМ реалізується методика силової спектроскопії, яка полягає у зближенні зонду з поверхнею зразка у певній точці в межах ділянки сканування. Далі реєструються сили, що діють на вістря зонда і які змінюються в залежності від переміщення зонда. При цьому здійснюється пружне деформування поверхні зразка. Результатом застосування силової спектроскопії є оцінка величини модуля пружності в залежності від глибини деформування поверхневого шару, параметри його в'язкопружного стану, адгезійні властивості покриття.

Методики нанотрибометрії полягають у визначенні сил тертя шляхом визначення латерального відхилення (кручення) консолі зонда АСМ при прямому та зворотному ковзанні вістря за зразком. За допомогою цих методик також можна оцінити величину попереднього зміщення і коефіцієнт тертя в режимі переходу від тертя спокою до тертя ковзання.

Принцип примусового руйнування вістрям зондом АСМ зразка використаний в методиці оцінки мікротвердості та зносостійкості поверхневих шарів матеріалів. Для цього використовується спеціальний зонд

з алмазним вістрям, який взаємодіє з поверхнею при поступовому навантаженні на неї зусиллям до 0,4 мН.

Загалом, методики наноіндентування за допомогою АСМ достатньо розповсюдженні; основні з них представлені на рис.1.19 [144].



Рисунок 1.19 – Класифікація методик наноіндентування поверхонь матеріалів з використанням методу АСМ

Враховуючи вищезазначене, можна зазначити, що за допомогою АСМ може бути реалізований метод комплексного контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ.

При цьому, в якості робочого режиму перспективним є контактний режим, що, на відміну від інших режимів роботи АСМ має максимальну швидкодію, перешкодостійкість та високу роздільну здатність, а також дозволяє реалізувати більшість методик дослідження механічних характеристик для великої номенклатури матеріалів.

В цілому, методом АСМ в контактному режимі найчастіше проводяться дослідження механічних характеристик поверхонь, рис.1.20.

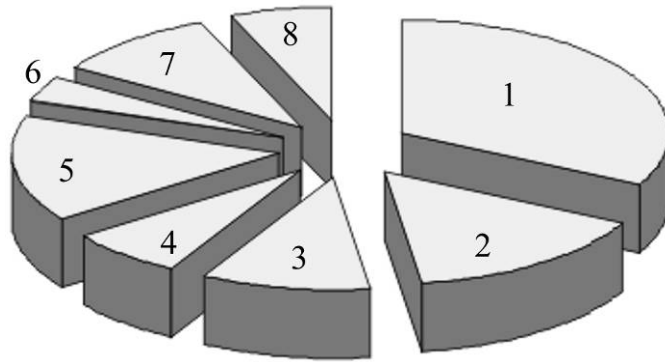


Рисунок 1.20 – Діаграма використання методик досліджень механічних характеристик поверхонь матеріалів методом АСМ в контактному режимі:

- 1 – визначення мікротвердості H ; 2 – визначення границі плинності σ ;
 3 – встановлення діаграми залежності плинності від внутрішніх напружень σ – ϵ ; 4 – визначення внутрішніх напружень; 5 – визначення модуля Юнга E ;
 6 – визначення адгезійної міцності W ; 7 – встановлення межі в'язкого руйнування K_{IC} ; 8 – визначення інших характеристик

Проте, експериментальні та розрахункові результати методик отримані за допомогою методів АСМ обов'язково потребують подальшої математичної обробки [128], [145]. Особливо це стосується методик по визначенню механічних характеристик матеріалів.

В даний час застосування програмних пакетів, високорівневих мов, інтерактивних середовищ дозволяє значно розширити можливості обробки та аналізу даних, отриманих методом АСМ [128]. Серед основних функцій цих програмних пакетів є функції обробки, аналізу координат та фільтрації профілю поверхні, які дозволяють визначати параметри шорсткості, хвилястості, відхилення форми, перешкоди та комбінацію цих компонентів.

Проте, як зазначалося в роботах [146] – [148] для аналізу характеру профілю поверхні використання параметричних критеріїв не є інформативним та ефективним. Тому, в програмних реалізаціях необхідний перехід від параметричних до непараметричних критеріїв оцінювання, реалізація якого відсутня в існуючих на сьогодні програмних засобах для обробки експериментальних даних АСМ.

Таким чином, з вищевказаного витікає необхідність удосконалення інструментальної та апаратно-методичної бази методів АСМ в контактному режимі, їх інформаційно-аналітичного забезпечення та засобів програмної реалізації, а також математично-комп'ютерної обробки результатів визначення стану поверхні та її механічних характеристик.

1.4. Основні чинники, що впливають на метрологічні характеристики процесу визначення геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів мікросистемної техніки методом атомно-силової мікроскопії

Для підвищення метрологічних характеристик процесу визначення геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ необхідно визначити чинники, що мають найбільший вплив на стан та працездатність блоку контролю АСМ, а саме:

- внутрішні: сили взаємодії між зондом та досліджуваною поверхнею (міжмолекулярні, електростатичні, пружні, капілярні та інші), інструментальні чинники (конструкція п'єзосканеру, геометрія зонду та термодрейф атомів зонду і поверхні), час зворотного зв'язку;
- зовнішні: вплив зовнішнього середовища (вібрацій, акустичних шумів, кліматичних факторів, тощо), людський фактор (правильність вибору зонду, режимів та середовища сканування, попередня підготовка зразків, тощо).

Внутрішні чинники.

Сили взаємодії між зондом та досліджуваною поверхнею. Основні сили взаємодії між зондом АСМ та досліджуваною поверхнею можна поділити на безконтактні, поверхневі та контактні [148] – [150].

До безконтактних відносять сили далекої дії (сили відштовхування), які не пов'язані з короткодійними міжатомними (сили тяжіння і відштовхування), які зазвичай називаються хімічними. При безконтактних

взаємодіях навіть найбільш близько розташовані один до одного атоми зонда і зразка знаходяться на відстанях, що помітно перевищують характерні довжини хімічних зв'язків в тілах ($0,2 - 0,3$ нм). До безконтактних сил відносяться: сили міжмолекулярного тяжіння (сили Ван-дер-Ваальса), електростатичні сили, сили електромагнітної взаємодії.

Під загальною назвою “поверхневі” приймаються сили, що виникають за наявності між поверхнями капілярно-адгезійних перемичок (плям контакту). В цьому випадку між близько розташованими атомами зонда і зразка можливе утворення хімічних зв'язків. Так, до поверхневих сил належать адгезійні та капілярні сили.

До контактних відносять сили, що з'являються в жорсткіших атомних контактах, коли взаємодія зонда із зразком супроводжується значними механічними деформаціями контактуючих тіл. Такі сили описуються в рамках класичної механіки суцільних середовищ. До контактних сил слід віднести пружні сили.

Інструментальні чинники. Однією з важливих проблем в АСМ є задача стабілізації елементів приладу та положення зонда над поверхнею досліджуваного зразка. Будь-який АСМ представляє собою набір елементів з різними фізичними характеристиками, які під дією внутрішніх та зовнішніх впливів викликають деформацію всієї конструкції, що істотно впливає на результати роботи приладу, рис.1.21.

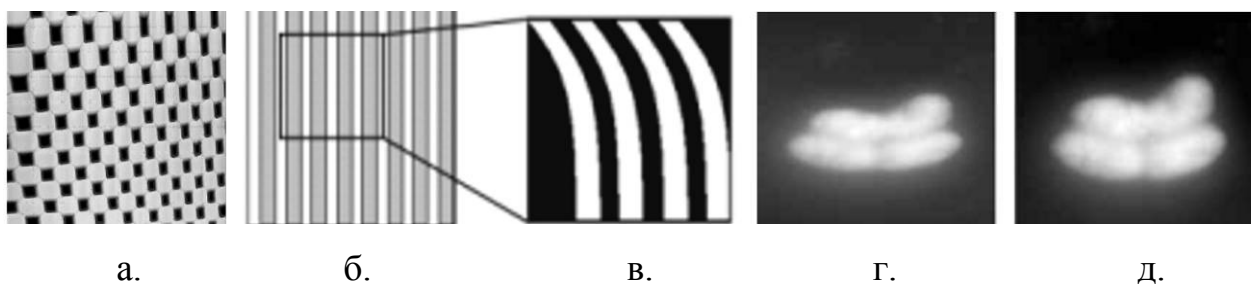


Рисунок 1.21 – Артефакти, що виникають внаслідок роботи АСМ під впливом інструментальних чинників

Пояснення до рисунку 1.21: а – власна нелінійність п'єзосканеру; б, в – спотворення внаслідок нерівномірності кроку сканування (кріп); г – спотворення істинного АСМ-зображення бактерії (д) внаслідок термічного дрейфу

Час зворотного зв'язку. Даний параметр забезпечує постійною силою тиску вістря на зразок. При цьому п'єзоелектричний перетворювач реєструє зміну рельєфу зразка або сили взаємодії вістря з поверхнею в режимі реального часу. Якщо не дотримано режим сканування і граничний час сканування зондом поверхні ($t_{кр}$) менший за сумарний час зворотного зв'язку п'єзоперетворювача (t_1), відгуку системи (t_2) та час керуючого сигналу (t_3), можлива ситуація при якій отримані результати сканування інтерпретуються приладом не правильно, рис.1.22.

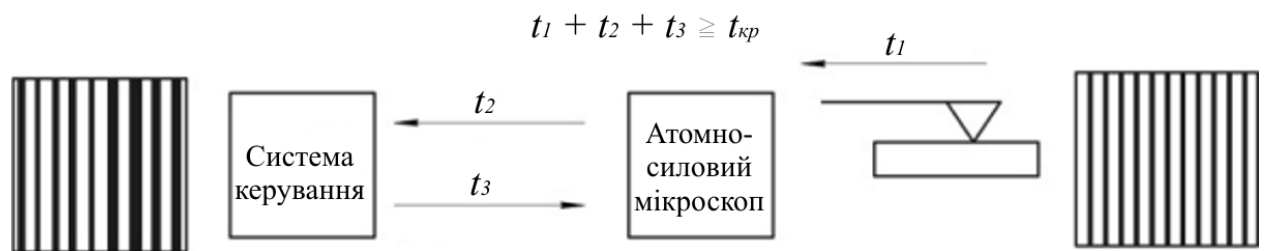


Рисунок 1.22 – Артефакти, що виникають внаслідок перевищення часу зворотного зв'язку критичного значення часу сканування: ліва частина рисунку – топограма поверхні, інтерпретована приладом; права частина – реальна поверхня зразка

Зовнішні чинники.

Вплив зовнішнього середовища. Серед факторів зовнішнього середовища найбільший вплив здійснюють: шуми, що пов'язані з зовнішніми вібраціями та шуми самого обладнання, не ідеальність п'єзосканеру, нестабільний контакт між зондом та зразком, постійний нахил досліджуваної поверхні та кліматичні фактори.

Будь-яка конструкція АСМ представляє собою коливну систему, що має набір власних резонансних частот ω_k . Зовнішній механічний вплив на

частотах, що співпадають з ω_k , викликає явище резонансу в конструкції зондів, що, у свою чергу, призводить до коливання зонда відносно зразка і сприймається як паразитний періодичний шум. Ще одним джерелом вібрацій елементів конструкцій АСМ є акустичні шуми різної природи. Особливістю акустичних перешкод є те, що акустичні хвилі діють безпосередньо на елементи конструкцій чутливих елементів. Це призводить до шкідливих коливань зонду відносно поверхні досліджуваного зразка, рис.1.23.



Рисунок 1.23 –Arteфакти, що виникають внаслідок дії зовнішніх чинників

Серед кліматичних факторів, окрім температурного впливу та вологості, які чинять негативний вплив виключно на результат сканування, такий чинник, як електричний пробій, що виникає внаслідок низки причин – діє не лише на результати сканування, але й чинить руйнуючу дію на зонд та схеми керування, рис.1.24.

Процес розвитку відмови дослідницького обладнання при пробії можна розділити на три види [151] – [154]:

– перший вид – електричний пробій, що виникає по тунельному або лавинному механізму при скануванні напівпровідників або активних діелектриків. Тунельний механізм пробою відбувається у вузьких (менше 0,1 мкм), зазвичай емітерних р-п-переходах, а лавинний – в широких (більше 1 мкм) переходах.

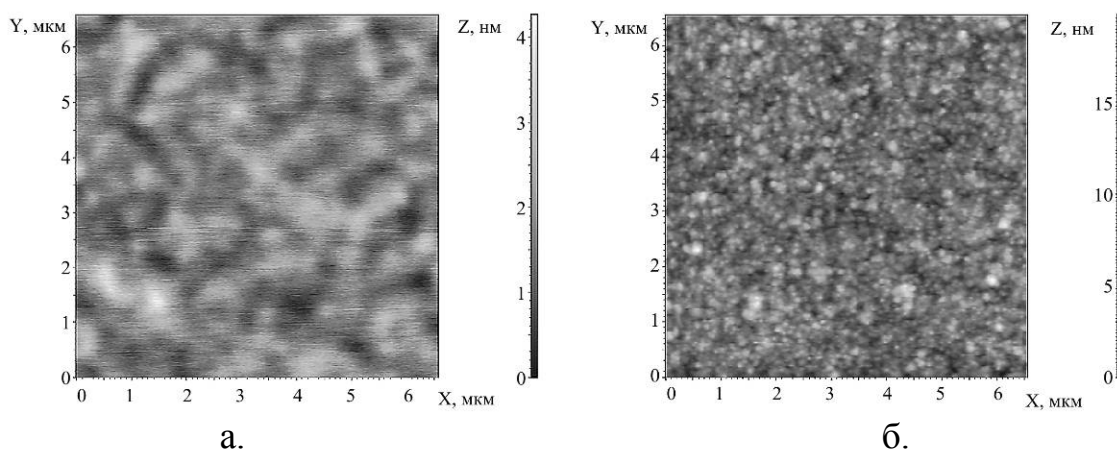


Рисунок 1.24 – Артефакти, викликані “електростатичним забрудненням”. Пояснення до рисунку 1.24: Приклад дії делокалізованого заряду: а – в умовах сканування наелектризованої поверхні; б – після зняття електростатичного заряду

Якщо зупинити процес на стадії електричного пробую, то помітних змін у роботі приладу не відбувається. Тому електричний пробій вважається оборотним.

– другий вид – пробій, що характеризується різким, стрибкоподібним збільшенням струму між поверхнею та досліджуваною поверхнею. Даний вид пробую зазвичай слідує за електричним пробоем, під час якого всередині структури розсіюється електрична потужність, що викликає локальний розігрів. При цьому для кремнію (з якого, головним чином, виготовляють зонди АСМ та більшість компонентів МСТ) необоротно погіршуються властивості навіть після короточасного його перебування у такому виді пробую.

– третій вид – необоротна трансформація структури приладу внаслідок сильного локального розігріву електричним струмом, що протікає через цей прилад. Характер змін в структурі, що відбуваються під час такого пробую, залежить як від властивостей самого приладу, так і від енергії, значення струму, тривалості його протікання через прилад. При цьому утворюється невеликий канал проплавлення діаметром в декілька десятків нанометрів.

Людський фактор. Вибір умов, режимів та типу зонду залежить від

об'єкту дослідження. Наприклад, при дослідженні біологічних об'єктів дослідження проводять в середовищі повітря, з використанням сферичних зондів в контактному режимі; порошки в середовищі повітря, за допомогою стандартних зондів в режимі “tape-mode”; а поверхні з розвиненим рельєфом в середовищі вакууму, за допомогою віскерів в контактному режимі. Більш детально режими і причини їх вибору описані в роботах [124], [155], [156].

Із вищевказаного і аналізу джерел, на рис.1.25 наводиться узагальнення чинників, що впливають на точність і надійність процесу контролю стану, топології та фізико-механічних характеристик поверхонь елементів мікросистемної техніки, причини виникнення та ступінь їхнього впливу на результати дослідження.

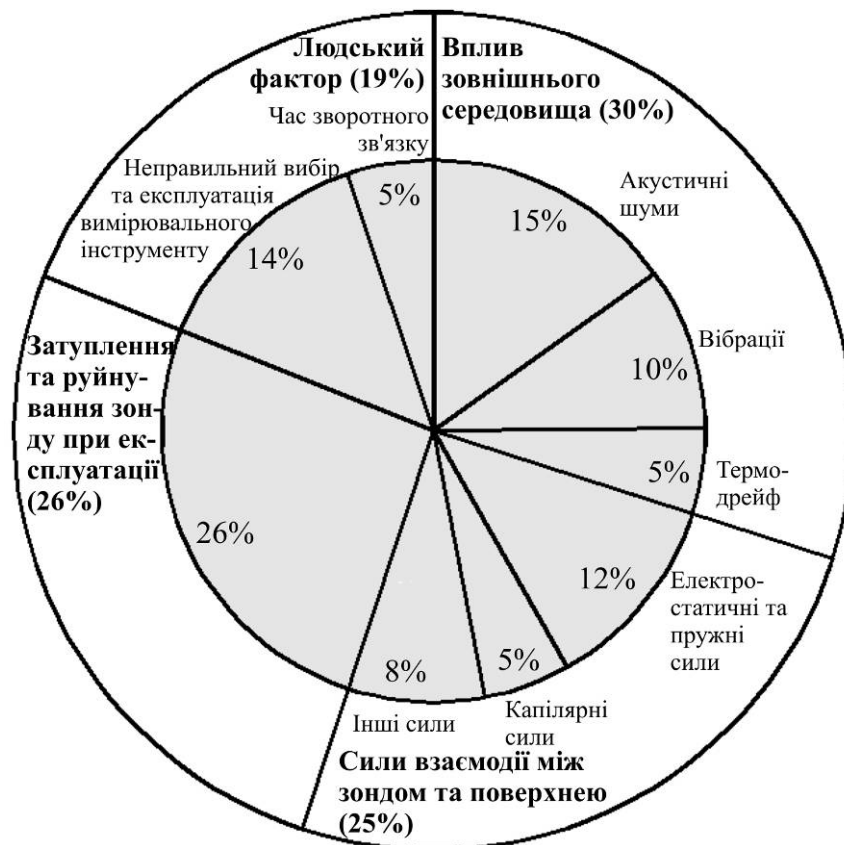


Рисунок 1.25 – Діаграма впливу чинників на метрологічні характеристики процесу контролю геометричних та механічних характеристик пристроїв МСТ

Серед методів усунення причин спотворення результатів дослідження поверхонь МСТ за допомогою АСМ та викликаних ними артефактів, слід виділити наступні: програмні (Фур'є-методи, фільтрація АСМ-зображень,

усереднення профілю тощо), апаратні та методичні [157] – [160].

З рис.1.25 видно, що такі чинники, як вплив зовнішнього середовища, дія сил взаємодії зонда з досліджуваною поверхнею, затуплення та руйнування зонду в процесі експлуатації та вибір режиму і дослідницького інструменту мають найбільший вплив на точність і надійність процесу контролю поверхонь матеріалів.

Таким чином, встановлено, що серед існуючих чинників найбільший вплив на точність, чутливість, надійність і відтворюваність результатів контролю характеристик поверхонь матеріалів виробів МСТ чинять такі: вологість, акустичні шуми та вібрації, поверхневий електростатичний заряд, комплексна дія сил взаємодії між зондом та досліджуваною поверхнею, робочі параметри блоку контролю та експлуатаційні характеристики зондів.

Тому, вирішенням проблеми підвищення метрологічних характеристик методу АСМ при визначенні геометричних та механічних характеристик пристроїв МСТ полягає в усуненні таких чинників, як: вологість, акустичні шуми та вібрації; підбір оптимальних режимів та умов проведення контролю та мінімізації комплексного впливу сил взаємодії між зондом та досліджуваною поверхнею на блок контролю АСМ, що дозволить покращити точність, чутливість і відтворюваність отримуваних результатів та збільшити приведений термін служби зонда АСМ. Загальна методика проведення теоретичних та експериментальних досліджень, що буде реалізована в дисертаційному дослідженні наведена в додатку А.

1.5. Висновки до розділу

Аналіз науково-технічної вітчизняної та зарубіжної літератури показав недосконалість та, в деяких випадках, відсутність належного методичного, математичного, інструментального та інформаційно-аналітичного

забезпечення для покращення метрологічних характеристик методу АСМ при контролі геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ:

1. Відсутня наукова методологія оцінки впливу дестабілізуючих факторів (кліматичних факторів оточуючого середовища та робочих параметрів процесу контролю) на точність, чутливість та відтворюваність результатів, отримуваних за допомогою АСМ.

2. Відсутні математичні моделі силової та енергетичної взаємодії зондів АСМ з поверхнями матеріалів, що дозволили б оцінити результати розрахунків окремих сил та теплових витрат.

3. Відсутні закономірності впливу кліматичних факторів оточуючого середовища на результати контролю геометричних і механічних характеристик компонентів МСТ, що дозволяють визначати діапазони зміни цих факторів, відхилення від яких призводить до погіршення точності, чутливості та відтворюваності отримуваних результатів.

4. Відсутні технічні засоби та спеціалізований програмний продукт, який би забезпечував формування якісного панорамного зображення контрольованої ділянки поверхні з високою роздільною здатністю та враховував крайові ефекти вздовж периметру окремих АСМ-зображень.

5. Неможливе проведення комплексного неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ через відсутність універсального інструментарію.

6. Відсутні належні методичні, технічні та програмно-апаратні засоби на основі яких можливе створення нових засобів на базі АСМ для контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь МСТ.

Таким чином, в роботі пропонується нове рішення науково-технічної проблеми удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки шляхом застосування автоматизованих систем вимірювання і контролю цих характеристик з урахування дії дестабілізуючих факторів, розроблення

математичних та експериментально-статистичних моделей, яке в цілому представляє собою наукові основи керування якістю процесу контролю на основі методу атомно-силової мікроскопії та має практичне значення для галузей мікросистемного та оптико-електромеханічного приладобудування з подальшим їх впровадженням у виробництво.

На основі проведеного аналізу визначені мета і задачі дисертації.

Метою дисертаційного дослідження є розроблення науково-обґрунтованих основ удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю компонентів мікросистемної техніки шляхом застосування автоматизованих систем вимірювання і контролю геометричних та механічних характеристик цих компонентів з урахування дії дестабілізуючих факторів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі *задачі*:

1. На основі аналізу стану проблеми обґрунтувати науковий підхід вирішення проблеми покращення методів та засобів атомно-силової мікроскопії для вимірювання і контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки.

2. Запропонувати наукову методологію оцінки впливу дестабілізуючих факторів (кліматичних факторів оточуючого середовища та робочих параметрів процесу контролю) на точність, чутливість та відтворюваність результатів, отримуваних за допомогою атомно-силової мікроскопії.

3. Розробити математичні моделі силової та енергетичної взаємодії зондів приладів атомно-силової мікроскопії з матеріалами на підготовчій, завершальній стадіях та стадії сканування, що дозволять визначити та мінімізувати лімітуючі фактори такої взаємодії, чим забезпечити стабільність процесу контролю геометричних та механічних характеристик цих матеріалів.

4. Розробити експериментально-статистичні моделі для оцінювання впливу кліматичних факторів та робочих параметрів атомно-силової мікроскопії на процес неруйнівного контролю геометричних та механічних

характеристик компонентів мікросистемної техніки.

5. Визначити діапазони кліматичних факторів та робочих параметрів методу атомно-силової мікроскопії, в межах яких відбувається покращення точності, підвищується чутливість та відтворюваність процесу контролю.

6. Встановити можливість застосування комбінованого електронно-променевого модифікування поверхонь зондів приладів атомно-силової мікроскопії для покращення їх експлуатаційних характеристик, що збільшить стійкість цих зондів до дії зовнішніх дестабілізуючих факторів.

7. Розробити метод підвищення точності, чутливості та відтворюваності процесу контролю характеристик компонентів мікросистемної техніки, що враховує дію дестабілізуючих факторів.

Список використаних джерел:

1. J.W. Gardner, *Microsensors: Principles and Applications*. Oxford, UK: Wiley, 1994.
2. N. Maluf, *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*. London, UK: Artech House, 2004.
3. В.В. Лучинин, “Микросистемная техника. Направления и тенденции развития”, *Научное приборостроение*, т. 9, №1, с. 3-18, 1999.
4. Д.М. Климов, А.А. Васильев, В.В. Лучинин, и П.П. Мальцев, “Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке”, *Микросистемная техника*, №1, с. 3-6, 1999.
5. А.В. Корляков, и В.В. Лучинин, “Перспективная элементная база микросистемной техники”, *Микросистемная техника*, №1, с. 12-15, 1999.
6. Л.Ю. Бочаров, и П.П. Мальцев, “Состояние и перспективы развития микроэлектромеханических систем за рубежом”, *Микросистемная техника*, №1, с. 41-46, 1999.

7. Е.В. Шалобаев, “Микросистемная техника и механотроника: особенности соотношения микро- и макроуровней”, *Микросистемная техника*, №4, с. 5-9, 2000.
8. *An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)*. Loughborough, UK: PRIME Faraday Partnership, 2002.
9. S. Costello, *Hermeticity Testing of MEMS and Microelectronic Packages*. London, UK: Artech House, 2013.
10. В.М. Теслюк, *Моделі та інформаційні технології синтезу мікроелектромеханічних систем*. Львів, Україна: Вежа і Ко, 2008.
11. B. Piriyanont et al., “Force-controlled MEMS rotary microgripper”, *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 24, pp. 1164-1172, 2015.
12. В.А. Гуртов, М.А. Беляев, и А.Г. Бакшеева, *Микроэлектромеханические системы*. Петрозаводск, Россия: ПетрГУ, 2016.
13. W.S. Cho, *To Introduction to dynamics and control in mechanical engineering systems*. Lincoln, NE, USA: Wiley, 2016.
14. W. Badawy, *Lab-on-a-Chip: Techniques, Circuits, and Biomedical Applications*. London, UK: Artech House, 2010.
15. C.T. Leondes, *MEMS/NEMS*. New York, NY, USA: Springer, 2006.
16. M. Gad-el-Hak, *MEMS: Applications*. Prague, Czech Republic: CRC Press, 2005.
17. Н.И. Мухуров, и Г.И. Ефремов, *Электромеханические микроустройства*. Электрон. текстовые данные. Минск, РБ: Белорусская наука, 2012. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.iprbookshop.ru/11516.html>. Дата обращения: Февр. 08, 2014.
18. A.D. Kelkar, et al., *Nanoscience and Nanoengineering: Advances and Applications*. Prague, Czech Republic: CRC Press, 2014.
19. П.П. Мальцев, В.А. Телец, и А.Ю. Никифоров, “Технологии и изделия микроэлектромеханики”, *Микросистемная техника*, №10, с. 18-24, 2001.

20. Ю.И.Степанов, С.А.Гамкрелидзе, и В.А. Телец, “Мобильные мини-роботы на основе интегрированных технологий микросистемотехники”, *Микросистемная техника*, №1, 2002.
21. М.В. Лобур, О.М. Матвійків, Б.Б. Дмитришин, та О.І. Файтас, *Методи і засоби проектування мікропотоків MEMS*. Львів, Україна: Львівська політехніка, 2010.
22. M. Hautefeuille, et al., “Development of a Microelectromechanical System (MEMS) – Based Multisensor Platform for Environmental Monitoring”, *Micromachines*, vol. 2, pp. 410-430, 2011.
23. N. Islam, *Microelectromechanical Systems and Devices*. Rijeka, Croatia: InTech, 2012.
24. J.C. Eloy, “Status of the MEMS industry in 2006”, *Sensors and Transducers Magazine*, vol. 66, iss. 4, pp. 521-525, April 2006.
25. Ю. Гірняк, “Мікроелектромеханічні системи у сучасному приладобудуванні”, *Вимірювальна техніка та метрологія*, № 69, с. 97-102, 2008.
26. П.П.Мальцев, В.А.Телец, и А.Ю.Никифоров, “Интегрированные технологии и изделия микросистемной техники”, *Микросистемная техника*, №11, 2001.
27. C.T. Leondes, *MEMS/NEMS Handbook Techniques and Applications (Vol.2)*. New York, NY, USA: Springer, 2006.
28. R. Dixon, “Prospects for MEMS in the automotive industry”, 2007. [Online]. Available: <http://www.memsinvestorjournal.com>. Accessed on: August 09, 2007.
29. A. Sadana, *Handbook of biosensors and biosensor kinetics*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science, 2010.
30. M. Kraft, and N. M. White, *MEMS for Automotive and Aerospace Applications*. Amsterdam, The Netherlands: Woodhead Publishing Limited, 2013.

31. N. Guarrotxena, *Research Methodology on Interfaces of Physics and Chemistry in Micro and Nanoscale Materials*. Boca Raton, FL, USA: Apple Academic Press Inc., 2015.
32. “Status of the MEMS industry 2018”, *Yole Development SARL*, Lyon, France, Rep., May 2018.
33. М.В. Стріха, “Графен на сегнетоелектричній підкладці: елементи пам’яті і модулятори випромінювання”, на V Міжнар. наук.-техн. конф. Сенсорна електрон. та мікросистемні технології (СЕМСТ-5), Одеса, 2012, с. 13-14.
34. “Світовий досвід та вітчизняна практика забезпечення розвитку інноваційної діяльності: інформаційно-аналітичні матеріали Кабінету Міністрів України до парламентських слухань на тему: “Стратегія інноваційного розвитку України на 2010–2020 роки в умовах глобалізаційних викликів”, *Економіст*, № 6, с. 18-27, 2009.
35. Г.О. Андрощук та ін., Нанотехнології у ХХІ столітті: стратегічні пріоритети та ринкові підходи до впровадження. Київ, Україна: УкрІНТЕІ, 2011.
36. М.О. Кизим, та І.Ю. Матюшенко, Перспективи розвитку і комерціалізації нанотехнологій в економіках країн світу та України. Харків, Україна: ВД “Інжсек”, 2011.
37. А.Т. Богорош, В.П. Соловьев, и С.А. Воронов, “Современная стратегия развития и интеграции науки в сфере новых веществ и материалов”, на XIII междунар. науч.-практ. конф. по инновац. деят. Проблемы и перспективы инновационного развития экономики, Киев, 2008, с.207-210.
38. A.B. Kaul, *Microelectronics to Nanoelectronics: Materials, Devices & Manufacturability*. Prague, Czech Republic: CRC Press, 2012.
39. J.B. Angell et. al., “Silicon Micromechanical Devices”, *Scientific American*, vol. 4, iss. 248, pp. 44-55, April 1983.
40. R. Ghodssi, and P. Lin, *MEMS Materials and Processes Handbook*. Berlin, Germany: Springer, 2011.

41. S. Sonmezoglu et al., "Dual-resonator MEMS Lorentz force magnetometer based on differential frequency modulation", in *4th IEEE Int. Symp. Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, Kauai, Hawaii, USA, 2017, pp. 60-63.
42. E. H. Klaassen, "Micromachined Instrumentation Systems", Ph.D. dissertation, Dept. Electric. Engineer., Stanford Univ., Stanford, CA, USA, 1996.
43. S. Lucyszyn, "Review of radio frequency microelectromechanical systems technology", *IEEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, vol. 151, iss.2, pp. 93-103, March 2004.
44. J. M. Bustillo et al., "Surface Micromachining for Microelectromechanical Systems", *Proceedings of the IEEE*, vol. 8, iss. 86, pp. 1552-1574, August 1998.
45. W. S. Trimmer, *Micromechanics and MEMS: Classic and Seminal Paper to 1990*. New York, NY, USA: IEEE Press, 1997.
46. В. Д. Вернер, П. П. Мальцев, А. Н. Сауров, и Ю. А. Чаплыгин, "Технология миниатюризации "сверху – вниз" или "снизу – вверх", Нано- и микросистемная техника, №1, с. 5-9, 2005.
47. Б. Г. Бондарь, Ю. Е. Гордиенко, А. В. Бородин, и Н. И. Слипченко, *Основы микроэлектронных устройств*. Киев, Украина: ІСДО, 1998.
48. А. О. Дружинін, І. Т. Когут, та Ю. М. Оверко, *Структури кремній-на-ізоляторі для сенсорної електроніки*. Львів, Україна: Львівська політехніка, 2013.
49. Я. І. Лепіх, Ю. О. Гордієнко, та С. В. Дзядевич, *Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління*. Одеса, Україна: Астропринт, 2011.
50. В. В. Лучинин, "Научно-технический прорыв на микроуровне", *Петербургский журнал электроники*, №3-4, с. 4-11, 2000.
51. И. Ш. Невлюдов, А. А. Андрусевич, и В. А. Палагин, *Микроэлектромеханические системы и нанотехнологии*. Харьков, Украина: Коллегиум, 2007.

52. И. Ш. Невлюдов и др., "Топология гибкого шлейфа для подключения к автоматизированным измерительным комплексам микросхем в корпусе FM-320", *Технология приборостроения*, №1, с. 21-25, 2012.
53. В. А. Палагин, "Методологические основы проектирования технологий производства компонентов микроэлектромеханических систем", дис. д-ра техн. наук, Харьковский нац. ун-т радиоэлектроники, Харьков, Украина, 2016.
54. В. В. Семенець, І. Ш. Невлюдов, та В. А. Палагін, *Введення в мікросистемну техніку та нанотехнологій*. Харків, Україна: Компанія СМІТ, 2011.
55. S. E. Lyshevski, *Nano- and microelectromechanical systems: fundamentals of nano- and microengineering*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press LLC, 2000.
56. A. Petrenko, "Macromodels of Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)", *Microelectromechanical Systems and Devices*, iss. 3, pp. 155-190, 2012.
57. В. И. Ваганов, "Классификация структур интегральных механоэлектрических преобразователей", *Измерительная техника*, №3, с. 27-29, 1980.
58. В. Варадан, К. Виной, и К. Джозе, *Высокочастотные МЭМС и их применение*. Москва, РФ: Техносфера, 2004.
59. M. Lobur, O. Matviyiv, and D. Lizanets, "Cells Modeling Approaches for Microfluidic Biodevices", на *XII міжнар. конф. Перспективні технології і методи проектування MEMC: MEMSTECH 2015*, Львів, 2015, с. 11-13.
60. И. Ш. Невлюдов и др., "Микросистемная техника", *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, №4 (16), с. 12-30, 2006.
61. М. М. Рожицький, К. М. Музика, та Г. М. Бендеберя, "Технологія виготовлення полімерного мікрофлюїдного пристрою", *Сенсорна електроніка та мікросистемні технології*, №4, с. 57-62, 2008.
62. Singleton L. et al., "Analysis of the MEMSTAND survey on standardization for microsystems technology", in *Proc. Int. Seminar MEM-STAND*, Barcelona, 2003, pp. 11-31.

63. International Organization for Standardization: TC 229 “Nanotechnologies”, 2010. [Online]. Available: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?commid=381983. Accessed on: May 19, 2010.
64. International Electrotechnical Commission: TC 113 “Nanotechnology standardization for electrical and electronic products and systems”, 2010. [Online]. Available: http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:0::::FSP_ORG_ID:1315. Accessed on: May 19, 2010.
65. Баршутин М. Н. Микромехатроника. Тамбов: ФГБОУ ВПО “ТГТУ”, 2014. 219 с.
66. H. J. De Los Santos, *Introduction to Microelectromechanical (MEM) Microwave Systems*. Boston, MA, USA: Artech House, 1999.
67. What is optical-MEMS? [Online]. Available: http://www.inems.com/MEMS_course_AREA/06_Applications/Optical_MEMS/Optical.htm, Accessed on: Jun. 5, 2014.
68. I. M. Hutchings, and G. D. Martin, *Inkjet Technology for Digital Fabrication*. Oxford, UK: Wiley, 2012.
69. K. S. Lion, “Transducers: Problems and Prospects”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, vol. IECI-16, iss. 1, pp. 2-5, July 1969.
70. R. M. White, “A Sensor Classification Scheme”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. UFFC-34, iss.2, pp. 124-126, March 1987.
71. Lj. Ristic, *Sensor Technology and Devices*. London, UK: Artech House, 1994.
72. University of Stanford. [Online]. Available: <http://www.stanford.edu/group/SML/ee321/ho/MEMS-01-intro.pdf>, Accessed on: Jun. 5, 2014.
73. N. L. Dmitruk, O. I. Mayeva, and M. V. Sosnova, *Polaritonic sensors. Encyclopedia of Sensors*. New-York, NY, USA: The Pennsylvania State University, vol. 8, pp. 21-33, 2006.

74. M. V. Sosnova et al., "Local plasmon excitations in one-dimensional array of metal nanowires for sensor applications", *Applied Physics B: Lasers and Optics*, vol.99, pp. 493-497, 2010.
75. D. Fang, J. Wang, and W. Chen, *Analysis of Piezoelectric Structures and Devices*. Berlin/Boston, Germany: Higher Education Press and Walter de Gruyter GmbH, 2013.
76. Yu-Chuan Su, Liwei Lin, and Albert P. Pisano, "Water-Powered Osmotic Microactuator", *Journal of microelectromechanical systems*, vol. 11, iss. 6, pp. 736-742, december 2002.
77. M. Chiao, and J. C. Chiao, *Biomaterials for MEMS*. Abingdon, UK: Pan Stanford Publishing, 2010.
78. Committee on Implications of Emerging Micro and Nanotechnology, National Research Council. *Implications of Emerging Micro- and Nanotechnologies*. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2002.
79. Advanced Diamond Technologies. [Online]. Available: <http://www.thindiamond.com/>, Accessed on: Jun. 12, 2013.
80. С. Сысоева, "MEMS-технологии – простое и доступное решение сложных системных задач", *Sovtest*, 2016. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.sovtest.ru/ru/publication/mems-tekhnologii-%E2%80%93-prostoe-i-dostupnoe->. Дата звернення: Квіт. 15, 2017.
81. А. Дрожжин, "MEMS: микро- электромеханические системы", *3Dnews*, 2011. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.3dnews.ru/editorial/MEMS-microelectro-mechanical-systems-Part-1>. Дата звернення: Берез. 03, 2017.
82. Г. А. Досовицкий, "Микроэлектромеханические системы", *Микроэлектромеханические системы*, 2010. [Электронный ресурс]. Доступно: http://www.nanometer.ru/2010/09/30/mems_218368.html. Дата звернення: Берез. 08, 2017.
83. A. Cumbo et al., "A synthetic nanomaterial for virus recognition produced by surface imprinting", *Nat. Commun.*, iss. 4, p. 1503, 2013.

84. М. В. Самсонова, "Наномедицина: современные подходы к диагностике и лечению заболеваний, вопросы безопасности", *Пульмонология*, №5, с. 5-13, 2008.
85. А. Данилов, "Польза и опасности применения медицинских нанотехнологий", *Nanonews*, 2015. [Электронный ресурс]. Доступно: <http://www.nanonewsnet.ru/blog/nikst/polza-opasnosti-primeneniya-meditsinskikh-nanotekhnologii>. Дата звернення: Квіт. 01, 2016.
86. J. C. Elie, "Status of the MEMS Industry 2018. Market and technology. Report by Yole Developpement", *Rep. Yoledevelopment*, 2018. Accessed on May, 2018.
87. About Yole Developpement. [Online]. Available: <http://www.yole.fr/>. Accessed on: Jun. 12, 2013.
88. Agere Systems announces MEMS-based optical switch component. [Online]. Available: <http://www.lightwaveonline.com/articles/2001/02/agere-systems-announces-mems-based-optical-switch-component-53466507.html>. Accessed on: Jun. 12, 2013.
89. G. W. Neudeck, and R. F. Pierret, "Introduction to Microelectronics Fabrication", vol. V, *Modular Series on Solid State Devices*, Eds. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1988.
90. S. Walsh et al., *MEMS and MOEMS Technology and Applications*. Bellingham, WA, USA: SPIE – The International Society for Optical Engineering, Ch. 8, 2000.
91. National Research Council. *Microelectromechanical Systems: Advanced Materials and Fabrication Methods*. Washington, D.C.: The National Academies Press, 1997. [Online]. Available: <https://doi.org/10.17226/5977>.
92. H. Santos, *Principles and Applications of NanoMEMS Physics*. New York, NY, USA: Springer, 2005.
93. J. H. Lau et al., *Electronic packaging: design, materials, process, and reliability*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1998.

94. J. Korvink, and O. Paul, *MEMS: A Practical Guide of Design, Analysis, and Application*. Berlin, Germany: Springer, 2006.
95. М. Рыбалкина, *Нанотехнологии для всех*. Москва, РФ: Nanotechnology News Network, 2005.
96. G. E. J. Poinern, *A Laboratory Course in Nanoscience and Nanotechnology*. Prague, Czech Republic: CRC Press, 2014.
97. J. Fraden, *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
98. P. Rai-Choudhury, *MEMS and MOEMS: Technology and Applications*. Bellingham, WA, USA: SPIE Press Monograph, 2000.
99. J. Liudi, and S. M. Spearing, “A reassessment of materials issues in microelectromechanical systems (MEMS)”. *Journal of the Indian institute of science*, vol 87, iss.3, pp. 363-385, 2007.
100. Keysight – Nanomeasurement Instruments for Industry R&D – Brochure. [Online]. Available: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-0535-EN.pdf>. Accessed on: May 21, 2014.
101. B. Bhushan, *Springer handbook of nanotechnology*. Berlin, Germany: Springer, 2010.
102. D. B. Williams, and C. B. Carter, *Transmission Electron Microscopy*. New York, NY, USA: Springer-Verlag Inc., 2009.
103. Г. М. Дубровська та ін., *Приклади застосування фізичних методів дослідження структури поверхні*. Сільхет, Бангладеш: Шобуж Біпоні, Удоун Офсет Принтерс, 2007.
104. В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, Ю. Ю. Бондаренко, П. В. Петльований, С. О. Білокінь, та М. О. Бондаренко, *Методи та засоби мікроскопії*. Київ, Україна: НТУУ “КПІ”, 2013.
105. В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, О. В. Верцанова, Ю. Ю. Бондаренко, С. О. Білокінь, та М. О. Бондаренко, *Мікроскопія в нанотехнологіях*. Київ, Україна: НТУУ “КПІ”, 2014.

106. С. Усеинов и др., "Измерение механических свойств материалов с нанометровым пространственным разрешением", *Наноиндустрия*, №2, с. 20-35, 2010.
107. V. Blank et al., "Nano-sclerometry measurements of superhard materials and diamond hardness using scanning: force microscope with the ultrahard fullerite C60 tip", *J. Mat. Res.*, vol.12, iss. 11, pp. 3109-3114, 1997.
108. С. С. Голубев, "Разработка и исследование методов и средств метрологического обслуживания сканирующих зондовых микроскопов", дис. канд. техн. наук, Всерос. науч.-исслед. ин-т метрологии им. Д.И. Менделеева, Москва, 2008.
109. Х. О. Надорожняк та ін., "Метрологічний аналіз та метрологічне забезпечення атомно-силової мікроскопії", *Методи та прилади контролю якості*, № 26, С. 77-84, 2011.
110. R. K. Leach et al., "The European nanometrology landscape", *Nanotechnology*, vol. 22, pp. 062001-062015, 2011.
111. G. Dai et al., "Metrological large range scanning probe microscope", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 75, pp. 962-969, 2004.
112. G. Wilkening, and L. Koenders, *Nanoscale Calibration Standards and Methods Dimensional and Related Measurements in the Micro- and Nanometer Range*. Weinheim, Germany: WILEYVCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005.
113. R. V. Lapshin, "Feature-oriented scanning methodology for probe microscopy and nanotechnology". *Nanotechnology*, vol. 15, iss. 9, pp. 1135-1151, 2004.
114. AFM probes catalog. [Online]. Available: http://www.nanoworld.com/probes_catalog.html. Accessed on: May 21, 2014.
115. Non-contact / Tapping mode AFM probes. [Online]. Available: http://nanoworld.com/prob_cat_01.html. Accessed on: May 21, 2014.
116. NT-MDT. [Online]. Available: http://www.ntmdt-tips.com/catalog/gratings/afm_cal/products.html. Accessed on: May 21, 2014.

117. HQ tips 15 series. [Online]. Available: <http://www.spmtips.com/nsc/15/>. Accessed on: May 21, 2014.
118. HI'RES-C14/CR-AU. [Online]. Available: <http://www.spmtips.com/dp/14/hires/albs>. Accessed on: May 21, 2014.
119. A. L. Weisenhorn et al., "Forces in Atomic Force Microscopy in Air and Water", *Appl. Phys. Lett.*, vol.54, iss. 26, pp. 2651-2653, 1989.
120. D. Sarid, *Scanning Force Microscopy With Application to Electric, Magnetic and Atomic Forces*. New York, NY, USA: Oxford University Press, 1991.
121. F. Giessibl, "Advances in Atomic Force Microscopy", *Reviews of Modern Physics*, vol. 75, iss. 3, pp. 949-983, 2003.
122. E. Meyer, "Atomic Force Microscopy", *Progress in Surface Science*, vol. 41, iss. 1, pp. 3-49, 1992.
123. G. Binnig, C. F. Quate, and C. Gerber, "Atomic force microscope", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 56, pp. 930-933, 1984.
124. А. А. Суслов, и С. А. Чижик, "Сканирующие зондовые микроскопы (обзор)", *Материалы, Технологии, Инструменты*, т.2, №3, с. 78-89, 1997.
125. F. J. Giessibl, "Advances in atomic force microscopy", *Reviews of modern physics*, vol.75, pp. 949-983, July 2003.
126. N. Jalili, and K. Laxminarayana, "A review of atomic force microscopy imaging systems: application to molecular metrology and biological sciences", *Mechatronics*, vol.14, pp. 907-945, 2004.
127. С. А. Чижик, А. П. Свириденко, и А. А. Суслов "Глаза и руки нанотехнологий", *Наука и инновации*, № 3, с. 53-55, 2009.
128. S. N. Magonov, and Myung-Hwan Whangbo, *Surface Analysis with STM and AFM: Experimental and Theoretical Aspects of Image Analysis*. Oxford, UK: Wiley, 2008.
129. R. C. Barrett, and C. F. Quate, "Optical Scan-Correction System Applied to Atomic Force Microscopy", *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 62, iss. 6, pp. 1393-1399, 1991.

130. Y. Ju et al., "A microwave probe nanostructure for atomic force microscopy", *Microsystem Technologies*, vol. 15, iss. 8, pp. 1195-1199, August 2009.
131. A. Boisen et al., "AFM probes with directly fabricated tips", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 6, iss. 1, pp. 58-62, 1996.
132. S. Akamine, R. C. Barrett, and C. F. Quate, "Improved atomic force microscopy images using cantilevers with sharp tips", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 57, pp. 316-318, 1996.
133. B. Anczykowski et al., "Cantilever dynamics in quasi non-contact force microscopy: spectroscopic aspects", *Phys. Rev. B.*, vol. 53, pp. 15485-15493, 1996.
134. M. Ashhab et al., "Dynamical analysis and control of microcantilevers", *Automatica*, vol. 35, iss. 10, pp. 1663-1670, 1999.
135. T. R. Albrecht et al., "Microfabrication of cantilever styli for the atomic force microscope", *J. Vac. Sci. Technol. A.*, vol. 8, pp. 3386-3396, 1990.
136. I. W. Rangelow, "Sharp silicon tips for AFM and field emission", *Microelectronic Eng.*, vol. 23, pp. 369-372, January 1994.
137. H. Liu et al., "Advanced atomic force microscopy probes: Wear resistant designs", *Journal of Vacuum Science & Technology B.*, vol. 23, pp. 3090-3093, 2005.
138. R. Wiesendanger, *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy*. Cambridge, UK: University Press, 1994.
139. J. F. Belak, "Nanotribology", *MRS Bulletin*, pp. 15-17, May 1993.
140. R. Overney, and E. Meyer, "Tribological investigations using friction force microscopy", *MRS Bulletin*, pp. 26-34, May 1993.
141. М. О. Бондаренко, та Ю. Ю. Бондаренко, "Перспективи використання методу атомно-силової мікроскопії для дослідження стану та фізико-механічних характеристик поверхонь виробів прецизійного машинобудування", на *III Всеукр. наук.-техн. конф. Прогресивні технології в машинобудуванні*, Львів, 2015, с. 20-22.

142. W. C. Oliver, and G. M. Pharr, "Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology", *Journal of Materials Research*, vol. 19, iss. 1, pp. 3-20, 2004.
143. G. M. Pharr, "Measurement of mechanical properties by ultra-low load indentation", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 253, iss. 1, pp. 151-159, 1998.
144. Nanomechanics, Inc. *Nanomechanics: InSEM Nanoindentation and iNano Nanoindenter*. Oak Ridge, TN, USA: Nanomechanics, Inc. Retrieved, Jun. 28, 2017.
145. S. A. Chizhik et al., "Mathematical interpretation of force gradient vs. distance curves obtained by atomic force microscopy for local analysis of adhesive properties of solids", in *Proc. Int. Conf. "Computer Methods and Inverse Problems in Nondestructive Testing and Diagnostics" (CM NDT-95)*, Minsk, 1995, pp. 271-274.
146. П. В. Кононов, В. Н. Востров, и И. Е. Кононова, "Применение атомно-силовой микроскопии для анализа напряженного и деформированного состояния детали с фланцем из латуни", *Физика твердого тела и электроника*, №6, с. 7-11, 2014.
147. C. Argento, and R. H. French, "Parametric tip model and force – distance relation for Hamaker constant determination from atomic force microscopy", *J. Appl. Phys.*, vol. 80, iss. 11, pp. 6080-6090, December 1996.
148. R. R. L. De Oliveira et al., *Atomic Force Microscopy – Imaging, Measuring and Manipulating Surfaces at the Atomic Scale*. Rijeka, Croatia: InTech, 2012.
149. Ю. Н. Моисеев, В. М. Мостепаненко, В. И. Панов, и И. Ю. Соколов, "Экспериментальное и теоретическое исследование сил и пространственного разрешения в атомно-силовом микроскопе", *ЖТФ*, т. 60, №1, с. 141-148, 1990.

150. J. L. Hutter, and J. Bechhoefer, "Measurement and manipulation of Van der Waals forces in atomic force microscopy", *J. Vac. Sci. Technol. B.*, vol. 12, pp. 2251-2253, 1994.
151. U. D. Schwarz et. al., "Tip artefacts in scanning force microscopy", *J. Microsc.*, vol. 173, iss. 3, pp. 183-197, 1994.
152. А. Л. Толстихина и др., "Специфические артефакты топографических изображений диэлектрических материалов в атомно-силовой микроскопии", *Кристаллография*, т. 52, № 5, с. 925-931, 2007.
153. М. Л. Занавескин, "Атомно-силовая микроскопия в исследовании шероховатости наноструктурированных поверхностей", дис. канд. физ.-мат. наук, Ин-т кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Москва, 2008.
154. Artifact Review and Badging. [Online]. Available: <https://www.acm.org/publications/policies/artifact-review-badging>. Accessed on: May 31, 2015.
155. T. W. Odom, "Laboratory manual, Nanoscale pattern and systems". [Online]. Available: <https://www.acm.org/publications/policies/artifact-review-badging>. Accessed on: March 10, 2004.
156. D. Rugar, and P. Hansma, "Atomic Force Microscopy", *Physics Today*, vol. 43, iss. 10, pp. 23-30, Oct. 1990.
157. P. M. Williams et al., "Blind reconstruction of scanning probe image data", *J. Vac. Sci. Technol. B.*, vol. 14, iss. 2, pp. 1557-1562, 2004.
158. J. S. Villarrubia, "Algorithms for Scanned Probe Microscope Image Simulation, Surface Reconstruction, and Tip Estimation", *J. Res. of the NIST*, vol. 102, iss. 4, pp. 425-454, July-Aug. 1997.
159. SurfaceXplorer [Online]. Available: <http://microtm.com/sx/sxr.htm>. Accessed on: Sept. 12, 2005.
160. D. Shuman et al., "Computerized Image Analysis Software for Measuring Indents by AFM", *Microscopy and Analysis*, vol. 107, 21 p, 2005.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ МЕТОДОМ АТОМНО- СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ

В розділі обґрунтовано вибір об'єктів дослідження, розроблено комплекс наукових методик теоретичних розрахунків, експериментальних досліджень та обробки результатів експерименту, а також наведено опис експериментального та контрольно-вимірювального обладнання.

В основі дисертаційної роботи лежать методи та засоби АСМ для вимірювання та контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ.

Для вирішення поставлених задач, застосовано наступні методи досліджень:

- аналітичні методи теорій контактної взаємодії в наносистемах; міжмолекулярної, електромагнітної взаємодії та технічної термодинаміки;
- методи математичної обробки статистичних даних;
- методи растрової електронної мікроскопії, скануючої атомно-силової мікроскопії, рентгенофлуоресцентного аналізу та мікротвердометрії;
- метод дискретного двохвимірною перетворення Фур'є для обробки результатів досліджень характеристик поверхонь матеріалів.

Комплекс розроблених в розділі розрахунково-експериментальних методик дає можливість підвищити точність, чутливість, відтворюваність і швидкодію процесу контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ методом АСМ.

Усі експериментальні дослідження базувались на стандартних та оригінальних методиках з використанням сучасної контрольно-вимірювальної апаратури. Для дослідження силових характеристик в зоні взаємодії зонду АСМ з досліджуваними поверхнями проведено розробку та випробовування вимірювального стенду.

Основні експериментальні та розрахункові роботи в рамках проведених досліджень здійснювались на кафедрі фізики Черкаського державного технологічного університету.

2.1. Обґрунтування вибору об'єктів та засобів проведення досліджень

Серед об'єктів, що досліджуються в дисертаційній роботі обрано пристрої МСТ та їх компоненти, які представляють клас пристроїв широко розповсюджених в різноманітних галузях науки та техніки (датчики мікроакселерометрів, мікрогіроскопи, мікроструменеві сопла, зонди гастроентеромоніторів, мікрооптичні системи) [1]. В той же час, в якості тестових зразків для відпрацювання робочих режимів, отримання та накопичення статистичних даних, підтвердження результатів наукових експериментів тощо, використовуються наступні об'єкти:

- прямокутні ($25 \times 25 \times 0,5$ мм) пластини з аморфного (a-Si) та монокристалічного (n-Si(111) кремнію;
- круглі ($\varnothing 20 \times 2$ мм) та прямокутні ($20 \times 20 \times 2$ мм) пластини з оптичного скла сорту “крони” марки К8;
- круглі ($\varnothing 30 \times 1$ мм) пластини з п'єзоелектричної кераміки марки ЦТС-19;
- прямокутні ($30 \times 30 \times 3$ мм) фрагменти з біокераміки системи CEREC;
- тонкі (товщиною менше 20 нм) оксидні та металеві покриття (SiO_2 , HfO_2 , Al_2O_3 , Ag, Au) осаджені на поверхнях пластин ($30 \times 30 \times 0,5$ мм) з кремнію Кр0 та нанорозмірні структури (плоскі відзеркалюючі решітки, наноконтакти та нанопровідники), сформовані на цих покриттях комбінованою електронно-променевою обробкою [2] – [4].

Такі матеріали та наноструктури знайшли найбільше розповсюдження у пристроях МСТ [5], мають різні фізико-механічні характеристики і потребують високоточного визначення параметрів геометрії їх поверхонь та механічних характеристик. Невідповідність цих елементів вимогам сучасних

міжнародних стандартів [6] – [8] призводить до введення в експлуатацію бракованих пристроїв МСТ. Некоректна робота таких пристроїв призводить до неправильної інтерпретації результатів отримання та обробки інформації з сенсорів, помилкової реакції пристрою на зовнішній фактор, передчасного виходу із ладу пристрою, а також збільшення часу на ремонтні та профілактичні зупинки систем, до складу яких входять ці пристрої.

В якості базового обладнання для проведення вимірювань та неруйнівного контролю обрано атомно-силовий мікроскоп марки “NT-206” (виробник: ТДВ “Микротестмашины”, м.Гомель, Білорусь), рис.2.1, технічні характеристики якого наведено в табл.2.1 [9].



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд атомно-силового мікроскопу “NT-206”
в комплексі з системою керування та ПК

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики атомно-силового мікроскопу марки “NT-206”

Характеристика	Значення
1	2
Поле сканування	Від 5×5 мкм до 50×50 мкм
Максимальна висота мікрорельєфу поверхні	2 – 4 мкм
Латеральна роздільна здатність (площина ХУ)	1 – 5 нм (в залежності від жорсткості поверхні зразків)

Продовження таблиці 2.1.

1	2
Вертикальна роздільна здатність (напрямок Z)	0,1 – 0,5 нм (в залежності від жорсткості поверхні зразків)
Система детектування відхилення консолі	Лазерно-променева з чотирьохсекційним позиційно-чутливим фотодетектором
Швидкість сканування	12 – 75 нм/с в площині XY
Корекція нелінійності	Програмна корекція руху сканеру
Мінімальний крок сканування	0,3 нм
Схема сканування	Рухомий зразок під нерухомим зондом.
Тип сканеру	П'єзокерамічний трубчастий
Зонди	Зонди, що виготовлені промислово на п'єзочипах розміром 3,4×1,6×0,4 мм
Розміри зразка	До 30×30×5 мм
Умови роботи	Відкрите повітря, 760 ± 40 мм рт.ст., 22 ± 4 °С, відносна вологість – не більше 70%
Діапазон автоматизованих переміщень зонду	10×10 мм в площині XY для мікропозиціонування зонду відносно досліджуваного об'єкту з кроком 2,5 мкм з оптичним візуальним контролем
Поле огляду вбудованої відеосистеми	1×0,75 мм
Віброізоляція	Антивібраційний стіл або підвіс

В якості інструменту для здійснення контролю використано п'єзочипи до яких прикріплено кремнієві консолі (як правило, один п'єзочип має до трьох консолей). На вільних кінцях консолей методом фотолітографії сформовані конічні зонди марки CSC38/No A1 (виробник: “Micromash”, Німеччина) з монокристалічного кремнію радіусом вістря 8 нм, кутом на вістрі 40°, довжиною 12-18 мкм, рис.2.2 [10].

Така марка зонду найбільш поширена при масовій діагностиці геометрії та механічних характеристик твердих поверхонь. В порівнянні з

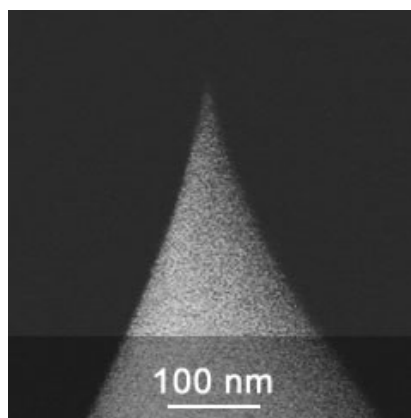


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд зонду марки CSC38/No Al.

Знімок отримано методом електронної мікроскопії.

іншими типами зондів він має наступні переваги: високу точність сканування (до 0,2 нм по осі Z та до 5 нм по осі XY); високу чутливість до невеликих перепадів рельєфу поверхні; не руйнує досліджувану поверхню; відноситься до бюджетного класу зондів (вартість таких зондів не перевищує 20 євро).

У якості перевірочних методів та засобів в роботі використано:

1. Перевірка точності, відтворюваності результатів та швидкодії контролю мікрогеометрії – тест-об'єкти – наноструктури на кремнії та оптичному склі у вигляді решітки-растру з відомими геометричними параметрами;
2. Перевірка точності та відтворюваності результатів контролю механічних характеристик – прилад DuraScan 10/20 (виробник: “Emco-Test Prufmaschinen GmbH”, Австрія), як найближчий за параметрами дослідження мікротвердості за Вікерсом.
3. Перевірка мікротвердості та зношуваності досліджуваних поверхонь – плавлений кварц, як найбільш однорідний та гомогенний еталонний зразок (ISO 6507-1:2005, ISO / TR 29381: 2008).

Усі експериментальні дослідження проводились за температури 293 К (при суперечних результатах – за температури 296 К). При дослідженні геометричних та механічних характеристик зразок встановлювався на предметний столик нерухомо. При цьому вплив вібраційних коливань та акустичні шуми зводилися до мінімуму.

2.2. Комплекс наукових методик теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень компонентів мікросистемної техніки методом атомно-силової мікроскопії

До складу комплексу наукових методик теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень, що розроблювався в дисертаційній роботі входять такі методики (табл.2.2).

Таблиця 2.2 – Склад комплексу наукових методик дисертаційної роботи

Назва методики	Очікуваний результат від реалізації
Методика комплексного контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ	Підвищення точності та відтворюваності результатів контролю характеристик поверхонь компонентів МСТ методом АСМ через застосування універсального інструменту та проведення комплексу досліджень
Методика контролю характеристик поверхневого шару матеріалів та тонких покриттів	Розширення можливостей методу АСМ при визначенні та контролі товщини, адгезійної міцності та зносостійкості поверхневого шару і тонких покриттів на компонентах МСТ
Методика математичної обробки результатів контролю поверхні матеріалів	Підвищення точності та якості результатів контролю (усунення артефактів АСМ-зображення, відновлення нанорельєфу поверхні)
Методика оптимізації режимів проведення контролю	Підвищення точності, чутливості та швидкодії результатів контролю методом АСМ шляхом обрання оптимальних робочих режимів при контролі геометричних та механічних характеристик
Методика прогнозування терміну експлуатації зонду АСМ та компонентів МСТ	Підвищення надійності контролю характеристик матеріалів МСТ методом АСМ шляхом встановлення призначеного та граничного часу експлуатації зондів АСМ та компонентів МСТ.

Комплекс наукових методик для контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь матеріалів передбачає:

– на підготовчому етапі: обрання оптимальних робочих режимів контролю геометричних та механічних характеристик в залежності від кліматичних факторів оточуючого середовища, розмірів та матеріалів об'єктів контролю;

– на етапі сканування поверхні: діагностування небезпечних артефактів на досліджуваній поверхні, що можуть привести до спотворення результатів контролю та руйнування елементів блоку контролю; контроль мікрогеометрії ділянки зразка та механічних характеристик (мікротвердості, зносостійкості, тощо) поверхні компоненту МСТ. Додатково (якщо це передбачає план проведення контролю) може проводитися контроль характеристик поверхневого шару зразка та/або тонких покриттів на ньому;

– на етапі обробки результатів: математичну обробку результатів контролю поверхні матеріалів, яка включає: усунення нахилу поверхні, фільтрацію отриманих даних, усунення артефактів сканування, тощо. Така обробка дозволить отримати високоточні та якісні топограми поверхні, а також результати контролю геометричних та механічних характеристик, значення яких можуть бути використані для прогнозування терміну експлуатації, як зонду АСМ, так і компонентів МСТ.

Методики експериментальних досліджень включають, як удосконалені відомі, так і оригінальні, створені автором методики, що призначені для: дослідження та контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь матеріалів (мікротвердості, зносостійкості, товщини та адгезійної міцності поверхневого шару матеріалів та тонких покриттів на них); математичної обробки результатів дослідження поверхні матеріалів шляхом усунення артефактів сканування та відновлення нанорельєфу поверхні, а також для оптимізації режимів роботи АСМ та прогнозування терміну експлуатації його робочого інструменту.

2.2.1. Методика комплексного контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів мікросистемної техніки

Методика комплексного контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ методом АСМ призначена для

визначення нанорельєфу досліджуваної поверхні, її мікротвердості та зносостійкості. Це дозволяє підвищити точність, швидкість та відтворюваність результатів контролю цих характеристик з урахуванням як релаксаційних процесів (пружного відновлення поверхні після припинення дії зонду), так і механічних процесів (утворення навалів матеріалу внаслідок його витиснення при фізичному проникненні зонду в поверхню).

Особливістю розробленої методики є те, що початкове підведення зонда до поверхні здійснюється в динамічному режимі. При цьому враховуються її гідрофільні властивості, чим нівелюється вплив вологи, осадженої, як на досліджуваній поверхні, так і на зонді АСМ [11].

Подальше визначення характеристик поверхні проводяться в статичному режимі. Це дозволяє контролювати нанорельєф та механічні характеристики поверхні з гарантованою точністю не залежно від адсорбованої на поверхні зразка вологи, а також макродефектів поверхні (виступів, перепадів рельєфу, макротріщин тощо), невраховування яких може призвести до руйнування зонду АСМ.

Комплексний контроль цих характеристик поверхонь компонентів МСТ методом АСМ проводиться в наступній послідовності:

- підготовка зразків до випробування [12];
- підготовка атомно-силового мікроскопу до роботи [13];
- налаштування системи детектування;
- встановлення утримувача зі зразком;
- підготовка до роботи АСМ в динамічному режимі;
 - налаштування параметрів генератора;
 - налаштування параметрів коливань (осциляції) кантилевера;
 - сканування зразка;
- підготовка до роботи АСМ в статичному режимі;
 - попередні налаштування блоку контролю;
 - режими установки параметрів зворотного зв'язку;
 - сканування поверхні зразка;
 - вимірювання та контроль мікротвердості зондом АСМ [14] – [16];
 - визначення зносостійкості поверхонь [15], [17];
- завершення роботи атомно-силового мікроскопу.

Детальний опис окремих частин методики викладено в роботах [13, 18],

написаних за безпосередньою участю автора дисертаційного дослідження.

Експериментальні підтвердження результатів роботи методики проводяться з використанням сучасних аналітичних методів та обладнання: растрової електронної мікроскопії (прилад: “JSM-6700F” (“JEOL”, США), скануючої атомно-силової мікроскопії (прилад: “NT-206” (ТДВ “Микротестмашины”, Білорусь) в поєднанні з методами мікротвердометрії за Вікерсом (прилад: “DuroScan-10/20” (“EMCO-TEST Prufmaschinen GmbH”, Австрія) та методів визначення коефіцієнту зношуваності (прилади: “АТ-101”, “FT2” (ТДВ “Микротестмашины”, Білорусь) для контролю мікрогеометрії поверхні, мікротвердості, зносостійкості, тощо.

Таким чином, наведена методика комплексного контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ, дозволяє підвищити точність (відносна похибка зменшується на 10 – 12%), надійність (ймовірність безвідмовної роботи блоку контролю – до 0,98), відтворюваність (коефіцієнт варіації зменшується на 1,8 – 2,1%) результатів та швидкодію (на 35 – 40%) процесу контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки.

2.2.2. Визначення характеристик поверхневого шару матеріалів та тонких покриттів на них

Методика визначення характеристик поверхневого шару та тонких покриттів на поверхнях матеріалів дозволяє визначати та контролювати механічні напруження, адгезійну міцність та товщину поверхневих шарів (покриттів) і є унікальною по-суті, оскільки дозволяє отримувати високоточні результати значень мікрогеометрії та механічних характеристик покриттів товщиною від 10 нм. Для визначення механічних напружень, що виникають, як в покриттях, так і на межі “покриття – основа” застосовується експериментально-розрахункова методика, яка ґрунтується на визначенні

ступеня проковзування зонду по зразку (фактично вимірюються складні згинаючі та крутильні моменти, що виникають в консолі) внаслідок дії сил тертя [18].

В цілому, підготовка АСМ та зразків до досліджень тонких поверхневих структур на них, а також сканування поверхні в динамічному та статичному режимах проводяться аналогічно за ті етапи, що проводяться для комплексного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ (п.2.2.1). Основною відмінністю в процедурі підготовки зразка є те, що для тонких покриттів та нанометричних поверхневих структур, використання хіміко-механічної обробки є недопустимим через можливість значних пошкоджень цих покриттів [19].

Для коректного обрання параметрів навантаження та затримки при визначенні режиму проведення контролю характеристик на першому етапі досліджень необхідно якомога точніше встановити товщину нанесеного покриття або поверхневого шару [20].

Для цього, в залежності від виду покриття (дискретне або суцільне) можна застосувати два підходи. Визначення товщини дискретного покриття із застосуванням методу АСМ проводиться в наступній послідовності.

- після підготовки зразка та його встановлення на предметний столик АСМ, включення приладу та запуску керуючої програми “SurfaceScan”, на панелі “Area” програми керування обирається область сканування з чітко визначеною межею нанесеного покриття;

- відступивши від цієї межі в сторону нанесеного покриття на відстань 1,5 – 2 мкм, проводять автоматичне підведення зонду до поверхні в статичному режимі натиском кнопки “Auto Z Approach” на панелі “Main”;

- після завершення процесу автоматичного підведення, на панелі “Main” натиском кнопок ручного режиму “вгору-вниз” з мінімальним кроком 0,2 нм досягають значення, що становить половину від показань індикатора “Z” на панелі “Indicators”;

- проводять ручне відведення зонда від поверхні на 1000 кроків (тобто

на відстань 0,2 мкм);

- здійснюють переїзд зонда відносно межі нанесеного покриття у бік поверхні без покриття (як і у випадку з покриттям – на відстань 1,5 – 2 мкм від цієї межі);

- у річному режимі зонд підводиться до поверхні на 1000 кроків (0,2 мкм) і далі, покроково, доки показання індикатора “Z” на панелі “Indicators” не змінить своє значення (відповідатиме відстані початку дії сил міжмолекулярної взаємодії – відстані до поверхні порядку 0,5 – 1 нм);

- за формулою: $h = m \cdot k$, де h – товщина досліджуваного покриття, нм; m – кількість кроків, здійснених у ручному режимі оператором при підведенні зонду АСМ до поверхні; k – мінімальна відстань на яку зонд наближається до поверхні за один крок ($k = 0,2$ нм); обчислюють ймовірну товщину досліджуваного покриття.

Абсолютна похибка визначення товщини покриття за даним способом не перевищує 1 нм.

У випадку суцільного покриття, визначення його товщини методом АСМ проводиться так.

- провівши підготовку зразка та встановлення його на предметний столик АСМ, включають прилад та запускають керуючу програму “SurfaceScan”. На панелі “Area” програми керування обирається область та точка на ній в якій буде проводитися визначення товщини покриття (або поверхневого шару);

- обирається процедура спектроскопії в точці на панелі “Main”;

- проводиться автоматичне виконання процедури спектроскопії в точці при натисненні кнопки “Start” на панелі “Main”;

- після завершення процедури і графічної побудови функції статичної силової спектроскопії у вікні візуалізації вимірянних даних “View spectroscopy data” (рис.2.3) прилад АСМ автоматично припиняє роботу. Отримані дані, представлені на графіку, можуть бути збережені на диску в текстовому або графічному форматі з використанням діалогу збереження файлу;

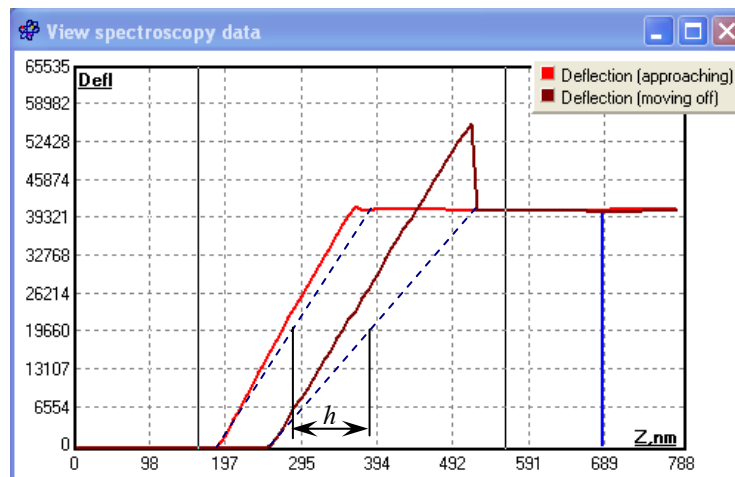


Рисунок 2.3 – Вікно візуалізації статичної силової спектроскопії
для визначення товщини покриття

– за графіком (рис.2.3) визначають ймовірну товщину h досліджуваного покриття.

Перевірка товщини отриманих покриттів проводиться резонансно-акустичним методом [19] на приладі “ИТГП-1М”, що підтверджує високу точність описаної в роботі методики визначення товщини тонкого несучільного покриття на діелектричних поверхнях.

Визначення напруженості адгезійної міцності на стирання $\sigma_{ст}$ проводиться за допомогою кривих “підведення-відведення” зонду АСМ до досліджуваної поверхні, рис.2.4 [21].

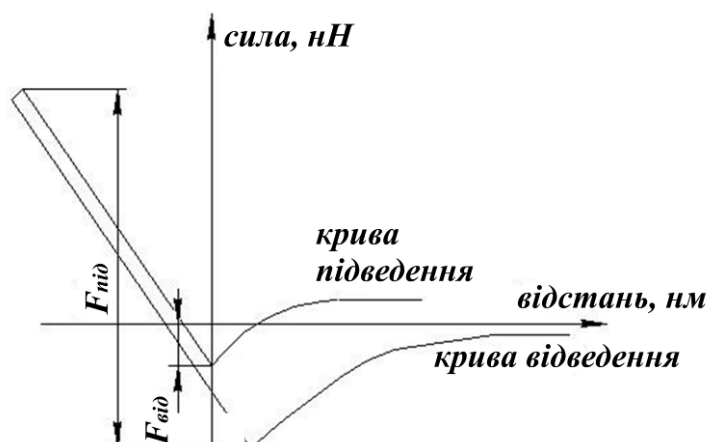


Рисунок 2.4 – Діаграма “підведення-відведення” зонду до поверхні

Така напруженість визначається як різниця сили підведення F_{nid} та сили

відведення F_{vid} , що приходяться на одиницю питомої площі поверхні зонду S , який входить у контакт з досліджуваною поверхнею:

$$\sigma_{адг.м.} = (F_{nid} - F_{vid}) / S. \quad (2.1)$$

Таким чином, може бути встановлений вплив сили адгезійної взаємодії, що виникає між зондом АСМ та досліджуваною поверхнею з нанесеним на неї покриттям.

Визначення мікротвердості тонких покриттів. Алгоритм визначення мікротвердості тонких покриттів аналогічний наведеному в п.2.2.1 для поверхонь суцільних матеріалів. Єдині параметри, що зазнають змін при визначенні мікротвердості тонких покриттів – це навантаження на зонд та час його витримки, які визначені автором експериментально в праці [22]: $F_{max} = 0,15 - 0,83$ мН; $\tau = 11 - 17$ с.

Контроль похибки визначення мікротвердості проводиться за еталонним зразком (в якості еталонного зразка використовується кремнієва пластина з алмазоподібним покриттям [14]). Порівняння отриманих результатів дослідження здійснюється за даними, отриманими атестованим методом.

Визначення зносостійкості поверхонь тонких покриттів. При проведенні досліджень тонких покриттів на їх зносостійкість, після підготовки зразків та налаштування АСМ до роботи, проводиться сканування досліджуваних поверхонь для вибору місця проведення трибологічного дослідження. Далі, обравши режим роботи приладу “Трибологічна лінія” визначається лінія проведення дослідження – однорідна поверхня без включень і різких перепадів рельєфу. При цьому слід задавати зростаюче навантаження (0,3 – 1 мН), час навантаження (1,5 – 6 мс) та кількість трибологічних ліній (треків) – від 3 до 5 [23].

По залежності сили від глибини проникнення зонда, виведеній на екран, оцінюються фізико-механічні характеристики досліджуваних поверхонь. Після цього сканується місце проведення трибологічної лінії сканування. Внаслідок цього визначається об'єм вдавненого матеріалу та об'єм матеріалу зміщеного в навали деформації по межах лінії сканування.

Далі проводяться обчислення коефіцієнту зносостійкості за формулою, що приводиться в праці [23].

Таким чином, наведена методика визначення характеристик поверхневого шару матеріалів та тонких покриттів на них з використанням методу АСМ дозволяє з точністю 8–12% визначати товщину таких покриттів, їх адгезійну міцність, мікротвердість та зносостійкість.

2.2.3. Математична обробка результатів досліджень поверхні матеріалів

Математична обробка результатів дослідження проводиться для підвищення точності та якості результатів дослідження. В результаті такої обробки відбувається:

- підвищення контрасту АСМ-зображення;
- відновлення нанорельєфу шляхом усунення нахилу, дефектів та артефактів на досліджуваній поверхні;
- фільтрація отриманих даних.

Це забезпечує отримання високоточних значень нанорельєфу та механічних характеристик поверхні МСТ [24]. Отримані значення використовуються для підвищення точності та відтворюваності контрольованих характеристик пристроїв МСТ, для встановлення раціональних робочих режимів АСМ, а також для прогнозування призначеного та граничного терміну експлуатації зондів АСМ.

Складання рівняння регресії для визначення метрологічних характеристик пристроїв МСТ методом планування багатofакторного експерименту. В основі методу планування багатofакторного експерименту лежить припущення про необхідність отримання певного уявлення про поверхню відгуку чинників, яку в загальному випадку можна аналітично записати у вигляді [25]:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i),$$

де Y – відгук процесу, тобто параметр, який підлягає вивченню та оптимізації, $X_1 \dots X_i$ – відомі параметри, що змінюються при постановці експерименту.

Значення Y та X визначаються в процесі проведення досліджень і є відомими на етапі багатофакторного планування експерименту. Проте вид їх функції зв'язку (моделі) до досліду не відомий і має бути знайдений за дослідними даними. При цьому вважаємо, що на значення Y , впливають не лише значення $X_1 \dots X_i$, але також ряд некерованих чинників, до яких відносяться похибки експерименту, неконтрольовані зміни довілля, тощо. Тому, навіть при фіксованих значеннях X , функція $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_i)$ поводить випадковим чином. У зв'язку з цим ставиться завдання знаходження її математичного очікування і дисперсії або довірчих інтервалів.

Оскільки вид функції Y заздалегідь не відомий, її обирають у вигляді фрагменту полінома, рівняння якого залежить від передбачуваного характеру залежності та необхідної точності її визначення.

Математичне очікування функції представляється у вигляді:

$$M(Y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i < j}^k \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \dots \quad (2.2)$$

При цьому коефіцієнти регресії можуть бути знайдені так:

$$\beta_1 = \frac{\partial f}{\partial X_1}; \quad \beta_2 = \frac{\partial f}{\partial X_2}; \quad \beta_{12} = \frac{\partial^2 f}{\partial X_1 \partial X_2}; \quad \beta_{11} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X_1^2}; \quad \beta_{22} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial X_2^2}; \dots, \quad (2.3)$$

Завданням регресійного аналізу є вибір вигляду функції Y (тобто фрагменту полінома) з подальшою оцінкою коефіцієнтів регресії. Вид функції має бути якомога простий, але в той же час повинен корелювати з реальною залежністю. Вибір виду функції базується на фізичних передумовах, матеріалах розв'язку аналогічних завдань тощо. Обраний вигляд функції в процесі регресійного аналізу перевіряється за відповідними критеріями і за необхідності може бути уточнений.

З огляду на особливості отримання АСМ-зображення розглядатимемо розкладання функції в степеневий ряд [26]. Точність, з якою степеневий ряд

описує той або інший процес залежить від порядку (міри) ряду, тобто від того, з яким показником міри є присутніми останні члени ряду. Якщо описувати будь-який процес у вузькому інтервалі змінних $X_1 \dots X_i$, то майже завжди можна обмежитися частиною степеневого ряду, залишивши лише члени нижчих порядків.

Для даної моделі обмежимося чотирма чинниками та одним відгуком. При розрахунках множинна регресія з чотирма предикторними змінними зводиться до послідовності простішої поліноміальної регресії.

На кожному рівні чинника X_i знаходиться рівняння наступного вигляду:

$$Y = \beta_{0i} + \beta_{1i} \cdot X_i + \beta_{2i} \cdot X_i^2 + \beta_{3i} \cdot X_i^3. \quad (2.4)$$

Рівняння (2.4) показує залежність відгуку Y від змінної X_i .

Для спрощення способів знаходження коефіцієнтів регресії приймаються наступні допущення.

1. Результати спостережень $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n$ (де n – число спостережень над величиною Y) є незалежними, нормально розподіленими випадковими величинами.

2. Дисперсії $D(y_i)$ дорівнюють одна одній або пропорційні відомій функції $\Phi(Y)$.

3. Змінні $X_1 \dots X_i$ є незалежними і визначаються з похибкою, якою можна знехтувати в порівнянні з величиною $\sigma[y_i]$.

Для пошуку коефіцієнтів використовується матричний метод, коли експериментальні дані представляються у вигляді двох матриць X та Y :

$$X = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{11} & x_{21} & x_{41} \\ x_{02} & x_{12} & x_{22} & x_{42} \\ x_{03} & x_{13} & x_{23} & x_{43} \\ x_{04} & x_{14} & x_{24} & x_{44} \end{pmatrix}; \quad Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix}.$$

Транспонована матриця X^* множиться на матрицю X та на матрицю Y . Із добутку X^*X обчислюється зворотна матриця, яка множиться на добуток X^*Y .

В результаті проведення проміжних операцій над матрицями, отримується матриця T :

$$T = (X^* X)^{-1} (X^* Y) = \begin{pmatrix} c_{00}(0y) & c_{01}(1y) & c_{02}(2y) & c_{03}(3y) \\ c_{10}(0y) & c_{11}(1y) & c_{12}(2y) & c_{13}(3y) \\ c_{20}(0y) & c_{21}(1y) & c_{22}(2y) & c_{23}(3y) \\ c_{30}(0y) & c_{31}(1y) & c_{32}(2y) & c_{33}(3y) \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

Звідки коефіцієнти β_i рівняння (2.4) розраховуються за формулою:

$$\beta_i = \sum_{j=0}^k c_{ij}(jy), \quad (2.6)$$

де $c_{ij}(ij)$ - елементи шуканої вище матриці T .

Таким чином, отримуються чотири рівняння залежності відгуку Y від фактора X_i

При використанні даної залежності, передбачення відгуку Y з достатньою точністю неможливе. Для того, щоб збільшити точність прогнозування вводиться нова змінна.

Для цього знаходиться залежність коефіцієнтів β_i від наступної змінної X_{i+1} у вигляді:

$$\beta_i = a_{0i} + a_{1i} \cdot X_{i+1} + a_{2i} \cdot X_{i+1}^2 + a_{3i} \cdot X_{i+1}^3 \quad (2.7)$$

для кожного з чотирьох знайдених рівнянь.

Для розрахунку коефіцієнтів використовується аналогічний підхід. Є матриця X та матриця Y :

$$X = \begin{pmatrix} x_{01} & x_{11} & x_{21} & x_{31} \\ x_{02} & x_{12} & x_{22} & x_{32} \\ x_{03} & x_{13} & x_{23} & x_{33} \\ x_{04} & x_{14} & x_{24} & x_{34} \end{pmatrix}; \quad Y = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}.$$

За аналогічними розрахунками отримується система із чотирьох рівнянь за якими встановлюється залежність коефіцієнтів β_{ji} від X_{i+1} .

Після підстановки цих рівнянь у формулу (2.4) отримується рівняння:

$$y = (a_{01} + a_{11} \cdot x_1 + a_{21} \cdot x_1^2 + a_{31} \cdot x_1^3) + (a_{02} + a_{12} \cdot x_1 + a_{22} \cdot x_1^2 + a_{32} \cdot x_1^3) \cdot x_2 + \\ + (a_{03} + a_{13} \cdot x_1 + a_{23} \cdot x_1^2 + a_{33} \cdot x_1^3) \cdot x_2^2 + (a_{04} + a_{14} \cdot x_1 + a_{24} \cdot x_1^2 + a_{34} \cdot x_1^3) x_2^3$$

При відкритті дужок, отримується вираз:

$$y = a_{01} + a_{11} \cdot x_1 + a_{21} \cdot x_1^2 + a_{31} \cdot x_1^3 + a_{02} \cdot x_2 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{22} \cdot x_1^2 \cdot x_2 + a_{32} \cdot x_1^3 \cdot x_2 + \\ + a_{03} \cdot x_2^2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_2^2 + a_{23} \cdot x_1^2 \cdot x_2^2 + a_{33} \cdot x_1^3 \cdot x_2^2 + a_{04} \cdot x_2^3 + a_{14} \cdot x_1 \cdot x_2^3 + a_{24} \cdot x_1^2 \cdot x_2^3 + a_{34} \cdot x_1^3 \cdot x_2^3$$

Після обчислення коефіцієнтів виконується статистичний аналіз рівняння регресії. Передусім, оцінюється точність відповідності отриманої моделі процесу, що вивчається, тобто адекватність моделі. Для перевірки гіпотези адекватності моделі визначається залишкова дисперсія (дисперсія адекватності S_{ad}^2), яка характеризує розсіяння емпіричних значень відносно розрахункових і визначається по шуканому рівнянню регресії:

$$S_{ad}^2 = \frac{S_R}{f_R}, \quad (2.8)$$

де S_R – залишкова сума квадратів, $f_R = N - (k + 1)$ – число ступенів свободи.

Залишкова сума квадратів визначається за формулою:

$$S_R = \sum_{u=1}^N y_u^2 - \sum_{i=0}^k b_i \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u. \quad (2.9)$$

Для перевірки гіпотези адекватності визначається дисперсія відтворюваності експерименту (F-критерій Фішера), яка розраховується за формулою:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}. \quad (2.10)$$

Гіпотеза приймається, якщо розрахункове значення F_p менше за табличне F_m для прийнятого рівня значущості.

Коефіцієнт детермінації R^2 при оцінці регресійних моделей інтерпретується, як відповідність моделі даним та обчислюється за формулою:

$$R^2 = 1 - \frac{\hat{\sigma}^2}{\hat{\sigma}_y^2}, \quad (2.11)$$

де дисперсії $\hat{\sigma}_y^2$, $\hat{\sigma}^2$ обчислюються за формулами:

$$\sigma^2 = \sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y}_t)^2, \quad \sigma_y^2 = \sum_{t=1}^n \left(y_t - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)^2. \quad (2.12)$$

Для аналізу точності визначення оцінок коефіцієнтів регресії за умови, що паралельні досліди відсутні, розраховується дисперсія коефіцієнта регресії S_{bi} за формулою:

$$S_{bi}^2 = \frac{S_y^2}{N}, \quad (2.13)$$

Для перевірки статистичної значущості коефіцієнтів регресії використовується t-критерій Стюдента:

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{bi}}. \quad (2.14)$$

Обчислене значення t-критерію порівнюється з табличним при заданому рівні значущості та відповідному числі ступенів свободи. Якщо для даного коефіцієнта виконується умова $t_i > t_{табл}$, тоді цей критерій значимості відрізняється від нуля. Вибіркові коефіцієнти, для яких дійсною є умова $t_i \leq t_{табл}$, є незначущі, тобто їх слід виключити з рівняння регресії.

Математична обробка АСМ-зображень.

RGB-алгоритм зміни контрасту. Даний алгоритм застосовується для підвищення контрасту вихідного зображення з метою візуального виявлення мікроефектів та артефактів поверхні.

Алгоритм полягає у знаходженні середнього значення яскравості пікселів. Для кожного пікселю значення яскравості переводиться із системи RGB в систему YCbCr, застосовуючи формулу:

$$YCbCr = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B, \quad (2.15)$$

де R , G , B – відповідно, частка внесення кожного з кольорів (червоного, зеленого та блакитного) в колір пікселю.

Далі знаходиться коефіцієнт збільшення (зменшення) контрасту, який залежить від того, наскільки необхідно змінити контраст: $k = 1 + 0,01 \cdot c$,

де c – величина, на яку необхідно змінити контраст кожного пікселя (може мати значення від -255 до 255). В залежності від початкового значення кожної компоненти пікселя, визначається його нове значення, враховуючи отриманий коефіцієнт k .

Алгоритм ABC-маски. Суть алгоритму полягає в тому, що після першого проходу по зображенню проводиться аналіз сусідніх пікселів згори та зліва та присвоюються унікальні номери всім незв'язаним об'єктам на зображенні. Пікселі розглядаються зліва-направо та згори-униз. На кожен піксель накладається ABC-маска, рис. 2.5.



Рисунок 2.5 – Варіанти накладання ABC-маски на зображення:

для випадку 0: поточний піксель – фон, жодних дій не відбувається;

для випадку 1: створюється мітка, яка присвоюється поточному пікселю;

для випадків 2-4: поточному пікселю присвоюється значення сусіднього.

У випадку конфлікту поточному пікселю також присвоюється будь-яке значення сусідніх пікселів. Після цього відбувається перерозподіл міток, враховуючи еквівалентні номери. Рекурсія в даному алгоритмі використовується, коли можна виділити самоподібність задачі. Суть алгоритму полягає в тому, щоб для кожного пікселя об'єкта викликається функція, яка присвоює йому певний унікальний номер, потім ця функція викликається для кожного сусіднього пікселя та інше.

Фур'є-фільтрація АСМ-зображення. Фур'є-спектр зображення складається з пікселів, що мають великий динамічний діапазон яскравості. Система відтворення зображень, як правило, не здатна правильно відобразити

настільки великий діапазон значень інтенсивності. Це призводить до того, що при звичайному відображенні спектра Фур'є втрачається значне число деталей. У зв'язку з цим для поліпшення зорового сприйняття півтонів, зображення спектру піддається логарифмічному перетворенню.

Фактично АСМ-зображення є згортою форми поверхні контрольованого зразка і зонда, через особливості форми якого виникають такі артефакти, як ефект розширення профілю та ефект заниження висот. Знання геометрії зонду дозволяє мінімізувати вплив цих артефактів на інтерпретацію отриманих зображень.

Крім того АСМ-зображення, як правило, мають загальний нахил, який може бути пов'язаний як з нелінійністю сканера, так і з температурним дрейфом. Також, під час сканування може відбутися збій, що проявляється в зміщенні ліній сканування. Причиною такого збою є дрейф ліній сканування – низькочастотна складова реєстрованого сигналу положення зонда над поверхнею, викликана неконтрольованими параметрами (низькочастотний шум). Усунення дрейфу передбачається застосуванням алгоритмів фільтрації з використанням дискретного двохвимірної перетворення Фур'є.

Найбільш ефективна реалізація такого алгоритму полягає у перебудові високочастотного фільтра. Основна перевага застосування Фур'є-фільтрації для даного завдання, крім того, що вона дозволяє легко змінювати частоту зрізу, полягає в тому, що одночасно аналізується спектральний склад сигналу для вибору оптимальних параметрів фільтру.

Частотна область цифрового зображення представляє собою простір в якому беруть значення змінні (u , v) Фур'є-перетворення. Як відомо, частота сигналу прямо пов'язана зі швидкістю зміни сигналу, тому частоти у Фур'є-перетворенні пов'язані з варіацією яскравості на зображенні. Найбільш повільно змінюється частотна складова ($u = 0$, $v = 0$), яка відповідає середній яскравості зображення. Низькі частоти, що відповідають точкам поблизу початку координат Фур'є-перетворення, визначають компоненти зображення, які повільно змінюються. У міру віддалення від початку координат вищі

частоти починають відповідати все більш швидким змінам яскравості, що представляє собою межі об'єктів та деталі зображення, які характеризуються різкими змінами яскравості, наприклад шумами на зображенні.

Алгоритм фільтрації зображення в частотній області полягає у наступному, рис.2.6.

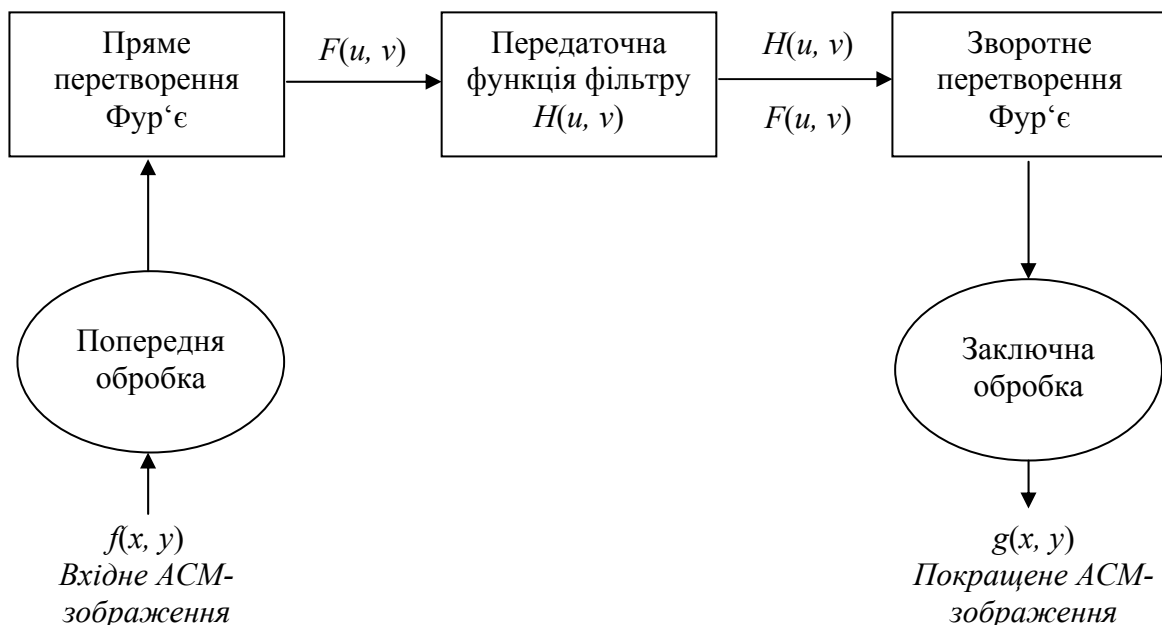


Рисунок 2.6 – Алгоритм фільтрації зображення в частотній області

1. Попередня обробка АСМ-зображення. Початкове зображення множиться на $(-1)^{x+y}$, для того, щоб його Фур'є-перетворення стало центрованим.

2. Обчислюється пряме дискретне перетворення Фур'є $F(u, v)$ функції $f(x, y)$ вихідного зображення розмірами $M \times N$:

$$F(u, v) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cdot e^{i2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right)}, \quad (2.16)$$

де $u = 0, 1, 2, \dots, M-1$; $v = 0, 1, 2, \dots, N-1$ – частотні змінні; x, y – змінні зображення.

3. Функція $F(u, v)$ множиться на функцію фільтру $H(u, v)$.

4. Обчислюється зворотне дискретне перетворення Фур'є в залежності від результатів отриманих на кроці 3:

$$f(x, y) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} F(u, v) \cdot e^{i2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)}. \quad (2.17)$$

5. Виділяється матеріальна частина результатів отриманих на кроці 4.

6. Результати отримані на кроці 5 множаться на $(-1)^{x+y}$.

Функція фільтру $H(u, v)$ або передавальна характеристика фільтру пригнічує деякі частоти перетворення, залишаючи інші без зміни.

Медіанний фільтр для видалення шуму. Медіанний фільтр – один з видів цифрових фільтрів, який широко використовується для зменшення рівня шуму на АСМ-зображенні (артефактів, пов'язаних з недотриманням вимог до процедури проведення досліджень: наявність вібрацій, акустичних шумів, термодрейфів тощо). При медіанній фільтрації для кожної точки АСМ-зображення будується варіаційний ряд для деякого її оточення. Тобто усі елементи оточення розташовуються в порядку зростання, а значення в певній точці замінюється на значення елемента, що займає центральне положення у варіаційному ряду. Медіанна фільтрація особливо ефективна при обробці зображень, що містять імпульсні перешкоди.

Усереднення по рядках застосовується для видалення горизонтальних смуг на зображенні шляхом вирівнювання середніх значень елементів в кожному рядку зображення. Наявність горизонтальних смуг на зображенні є характерним спотворенням АСМ-зображень. Це пов'язано з тим, що АСМ-зображення в експерименті зазвичай виходять шляхом сканування в горизонтальній площині, а час між вимірами в сусідніх точках одного рядка істотно менше за час між вимірами сусідніх точок в напрямку, перпендикулярному напрямку сканування.

Реалізується медіанний фільтр за допомогою вікна, що складається з непарної кількості комірок. Значення комірок усередині вікна упорядковано по порядку і середнє значення, тобто значення, яке знаходиться в середині упорядкованого списку, приймається вихідним значенням.

На наступному кроці вікно пересувається на одну комірку вперед і обчислення повторюються. При цьому дана функція на вхід приймає

зображення та розмір вікна фільтрації, а на виході повертає відфільтроване зображення. Щоб не прописувати значення кожного елемента масиву, який буде сортуватись, для обчислення індексу елемента масиву використовується формула:

$$ind = 2 \cdot sz \cdot ii + ii + jj, \quad (2.18)$$

де ind – значення індексу масиву, який сортується; sz – відстань від середнього елемента вікна до країв; ii – номер рядка вікна, в якому знаходиться елемент; jj – номер стовпця вікна, в якому знаходиться елемент.

Для визначення значення кожного елемента масиву, використовують формулу:

$$mas[ind] = image[i + (ii - sz), j + (jj - sz)], \quad (2.19)$$

де mas – масив елементів; $image$ – масив пікселів зображення; i – номер рядка пікселя; j – номер стовпця пікселя.

Після процедури фільтрації можливе проведення кількісного аналізу зображень. Перелік визначених параметрів визначається методикою проведення дослідження, проте, фактично в усіх випадках можливе визначення параметрів нанорельєфу та побудова Фур'є-спектру (рис.2.7).

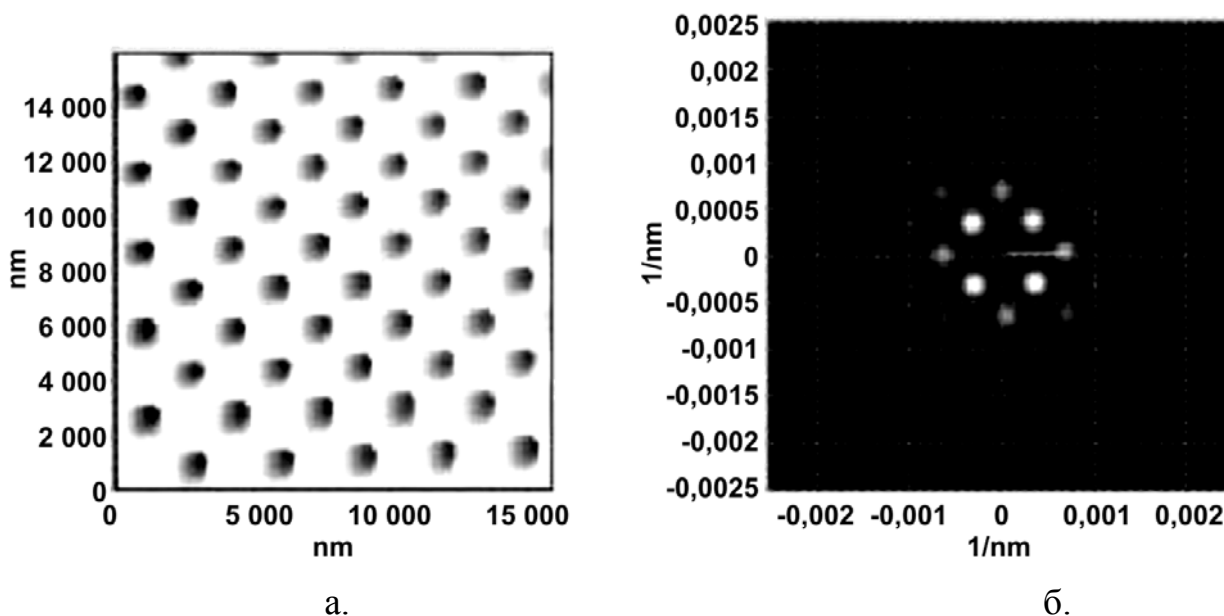


Рисунок 2.7 – Приклад аналізу двовимірного періодичного зображення (а) за допомогою побудови Фур'є-спектру (б)

Порівняння алгоритмів обробки АСМ-зображень.

Порівняння медіанних фільтрів відбувається за розміром вікна та кількості накладань. Найкращі результати обробки показали вісім накладань медіанного фільтра з розміром вікна 5×5 пікселів або поєднання одного накладання фільтра з розміром вікна 9×9 пікселів та 5×5 пікселів.

Окрім якості обробки порівнювалася також і швидкість роботи кожного алгоритму. Для цього по сто разів виконувалася обробка зображення за цими методами. При цьому вимірювався та порівнювався час роботи кожного виконання, рис.2.8.

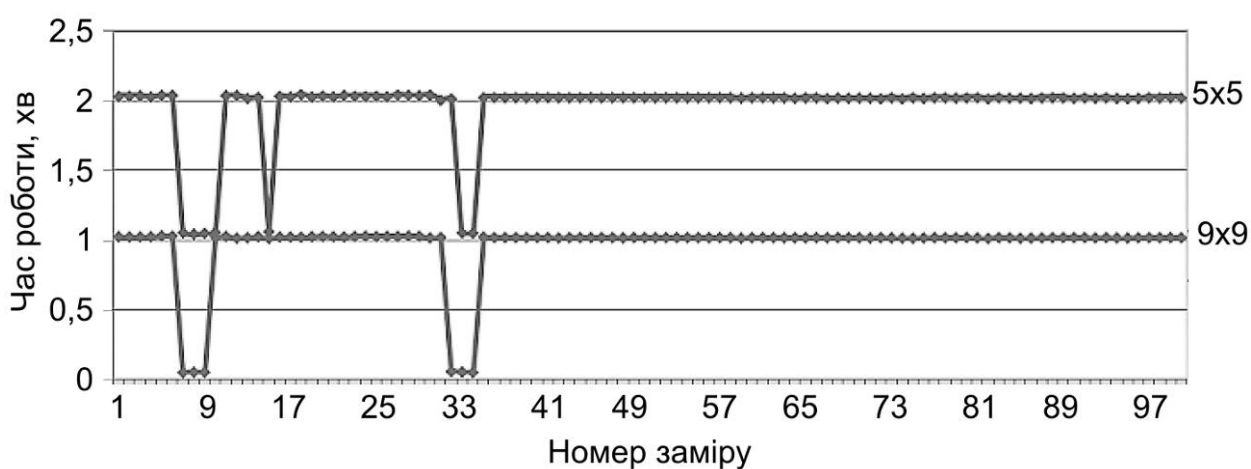


Рисунок 2.8 – Графік порівняння часу роботи медіанних фільтрів

З графіку (рис.2.8) видно, що краще проводити медіанну обробку АСМ-зображення за допомогою поєднання одного накладання фільтра з розміром вікна 9×9 пікселів та 5×5 пікселів.

Також порівнювалися алгоритм виділення суміжних областей АВС-маскою та рекурентний алгоритм.

З порівняльного графіку наведеному на рис.2.9 видно, що доцільніше використовувати модифікований алгоритм АВС-маски. Особливо, якщо врахувати, що рекурентний алгоритм не тільки працює повільніше в усіх випадках, але й використовує занадто великий об'єм пам'яті.

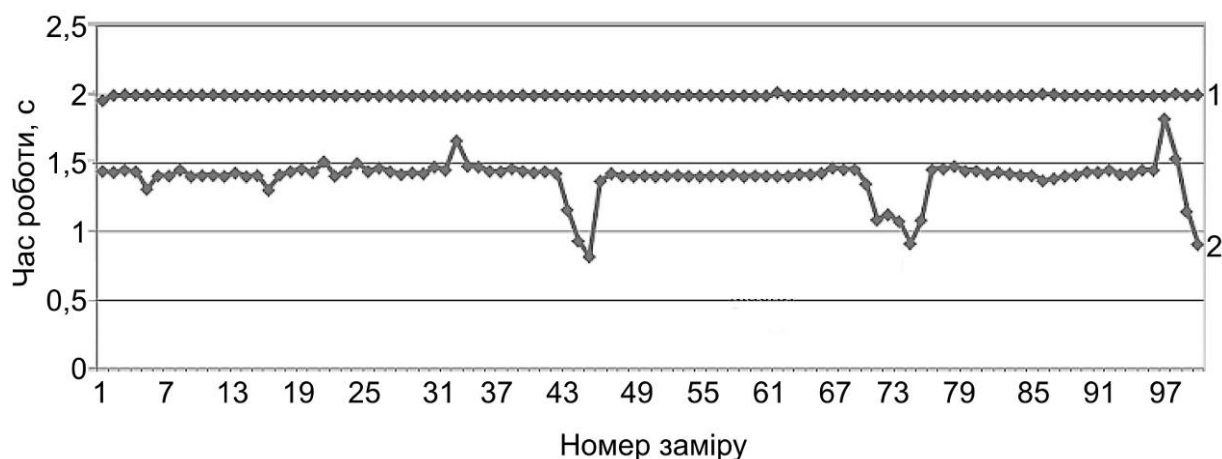


Рисунок 2.9 – Графік порівняння часу роботи алгоритмів виділення суміжних областей: 1 – рекурентний алгоритм; 2 – модифікований алгоритм ABC-маски

Остаточно порівнюючи результати отримані за допомогою Фур'є-фільтрації вихідного АСМ-зображення за допомогою корекції ліній на основі значення середньоарифметичної висоти усіх точок та за допомогою медіанної корекції (рис.2.10) було встановлено, що застосування алгоритму медіанної корекції дозволяє максимально усунути артефакти АСМ-зображення, чим забезпечує отримання високоточних значень геометричних та механічних характеристик поверхні МСТ.

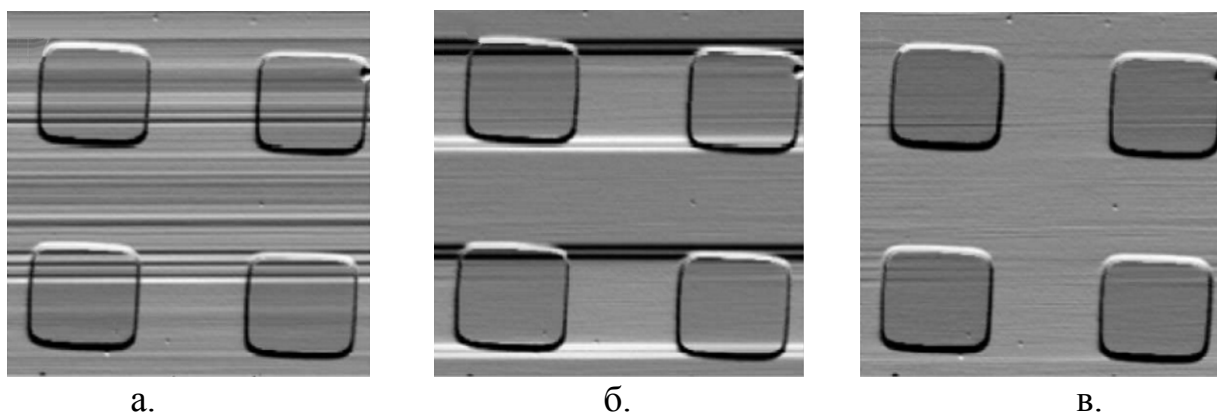


Рисунок 2.10 – Результати Фур'є-фільтрації ділянки 10×10 мкм вихідного АСМ-зображення (а) за допомогою корекції ліній на основі значення середньоарифметичної висоти усіх точок (б), за допомогою медіанної корекції (в)

Запропоновані алгоритми та процедури математичної обробки результатів досліджень поверхонь МСТ реалізовані автором у вигляді програмного модулю.

2.2.4. Оптимізація режимів контролю методом атомно-силової мікроскопії

Вибір найбільш відповідних режимів контролю мікрогеометрії поверхні та її механічних характеристик в залежності від дестабілізуючих факторів неможливий без оптимізації цих режимів.

Постановка задачі оптимізації. Задача параметричної оптимізації полягає у визначенні вектора оптимізуючих змінних $X = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, який відповідає найбільшому або найменшому значенню обраного критерію оптимальності $f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ в області D , що задана обмеженнями на початкові та вихідні параметри процесу:

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_m) > 0, i = 1, 2, \dots, n; \quad (2.20)$$

$$h_j(x_1, x_2, \dots, x_m) = 0, j = n+1, n+2, \dots, l; \quad (2.20')$$

При розв'язанні цієї задачі цільова функція $f(X)$ та функції, що визначають обмеження на область допустимих рішень $g_i(X) > 0, i = 1, 2, \dots, n, h_j(X) = 0, j = n+1, n+2, \dots, l$ є нелінійні функції від вектора X оптимізуючих змінних, тому задача розглядалась, як задача нелінійної багатовимірної оптимізації. Це дозволяє обрати найбільш ефективні методи визначення оптимальних параметрів режимів проведення контролю, такі як методи послідовної безумовної мінімізації, ковзаючого допуску, та пошуку глобального екстремуму функції [27] – [29].

При використанні методу послідовної безумовної мінімізації [27], [28] отримано найбільший оптимізуючий ефект за рахунок постійного компромісу між необхідністю виконання обмежень та процесом мінімізації цільової функції, який досягався шляхом присвоєння належної ваги цільовій функції та функціям, що задавали обмеження.

Метод внутрішніх штрафних функцій, який покладений в основу методу послідовної безумовної мінімізації [29], апроксимує нелінійну задачу з обмеженнями:

$$\min f(X), g_i(X) \geq 0, i = 1, 2, \dots, n, h_j(X) = 0, j = n+1, n+2, \dots, l \quad (2.21)$$

послідовністю зв'язаних з нею задач без обмежень:

$$\min \{F(X) = f(X) + P_k(X) | X \in E^m\}, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.22)$$

кожна з яких може бути успішно розв'язана за допомогою ефективного методу безумовної оптимізації. Як метод послідовної безумовної оптимізації використовували узагальнений метод бар'єрів.

Метод ковзаючого допуску дозволив мінімізувати цільову функцію $f(X)$, $X \in E^m$ при допущеннях:

$$h_j(X) = 0, j = 1, 2, \dots, n; \quad (2.23)$$

$$g_i \geq 0, i = n+1, n+2, \dots, l; \quad (2.23')$$

де функції $f(X)$, $h_j(X)$ та $g_i(X)$ були як лінійні, так і нелінійні відносно оптимізуючих змінних. Систему обмежень (2.20) представляли у вигляді:

$$\Phi^k - T(X) \geq 0, \quad (2.24)$$

де Φ^k – значення критерію ковзаючого допуску на кожному етапі пошуку: $T(X)$ – функціонал над множиною усіх обмежень, які задані співвідношеннями (2.23) та (2.23').

При багатоекстремальній цільовій функції та наявності розривної області допустимих рішень застосовували метод статистичного програмування, який базується на поєднанні методів статистичних випробувань та статистичного градієнта. Він дозволяє розв'язати задачу багатомірної нелінійної оптимізації, яка полягає у знаходженні вектора оптимізуючих змінних $X^* = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ в області D , що задана обмеженнями:

$$\varphi_j(X^*) \geq 0, j = 1, 2, \dots, m, \quad f(X^*) = \sup f(X), \quad (2.25)$$

де $f(X)$ і $\varphi_j(X)$ – функції n -мірного вектора, який задовольняє умовам безперервності на усій області зміни X при використанні функції:

$$R(X) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } X \in D; \\ 0, & \text{якщо } X \notin D. \end{cases} \quad (2.26)$$

Тоді задача пошуку вектора X^* для функції $f(X)$ зводиться до задачі визначення оптимального значення в усій області зміни змінних для функції $H(X) = f(X) R(X)$.

Порядок розв'язання задачі оптимізації в MathLab.

1. Задаються значення коефіцієнтів пошукової функції C_{ij} ; постійної кроку g ; приросту; початкових точок x_1, x_2 ; кількості кроків k (задається для уникнення за циклювання). Також задаються максимальне та мінімальне значення пошукової функції: min, max .

Слід зазначити, що при використанні цього алгоритму оптимізації повертається значення зі знаком мінус, коли необхідно знайти мінімум, а алгоритм шукає максимум, і навпаки. Далі, для оптимізації при конкретних значеннях min та max треба виконати функцію, яка приймає один параметр і дозволяє обчислити цю функцію. Так, функція MathLab `fminbnd (fun, x_min, x_max)` мінімізує скалярну функцію скалярного аргументу на інтервалі $[x_min; x_max]$. Тут `fun` – хендл функції, що оптимізується. При виконанні оптимізації функція викликається необхідну кількість разів.

2. Робиться перевірка умови зупинки роботи функції пошуку оптимізації. Для цього здійснюється “спуск” по чергово по двом координатам: $Gr_2 = C_0 + \sum_{j=1}^m j \cdot C_{1j} \cdot x_1$; $Gr_2 = C_0 + \sum_{j=1}^m j \cdot C_{2j} \cdot x_2$ та приріст координат: $x_1 = x_1 + gGr_1$; $x_2 = x_2 + gGr_2$. Далі робиться перевірка умови зупинки за наступною нерівністю: $\sqrt{Gr_1^2 + Gr_2^2} \leq d$. Якщо дана умова виконується, робиться зупинка в пошуку оптимального значення функції, в іншому випадку – повторюється пошукова операція (п.2).

3. Засобами MathLab будується оптимізаційний графік за яким знаходиться розв'язок оптимізаційної задачі.

Запропонована методика та порядок розв'язання представлені у вигляді програми написаної автором на мові програмування математичного процесору MathLab і дозволяють розв'язати задачі оптимізації режимів проведення контролю геометричних та механічних характеристик в

залежності від дестабілізуючих факторів.

2.2.5. Прогнозування терміну експлуатації зонду атомно-силового мікроскопу

Методика прогнозування терміну експлуатації зонду АСМ включає наступні етапи [30].

1. На основі характеристик, що отримуються за допомогою АСМ на еталонних зразках (мікронерівності, мікротвердість та інше) будується графік залежностей вимірюваних та інформативних параметрів виробів, який необхідний для того, щоб правильно обрати апроксимуючу функцію за одним із законів: лінійному; параболічному; гіперболічному; експоненціальному.

Апроксимуючі функції, їх графіки та формули для обчислення постійних коефіцієнтів рівнянь регресії наведені в табл.2.3.

Коефіцієнти рівняння регресії обчислюються для кожного контрольованого параметра. Потім визначається час до перетину графіку з верхньої або нижньої границею параметру за формулами:

– для лінійної апроксимації:
$$t_i = \frac{x_{ni}^{ni} - b}{a}, i = 1, \dots, N_x; \quad (2.27)$$

– для параболічної апроксимації:
$$t_i = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4a(c - x_{ni}^{ni})}}{2a}, i = 1, \dots, N_x; \quad (2.28)$$

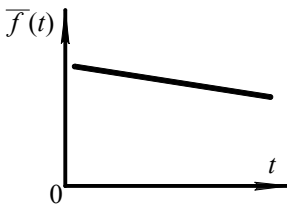
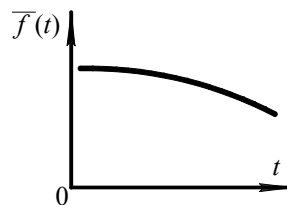
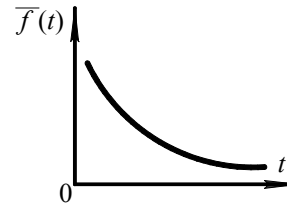
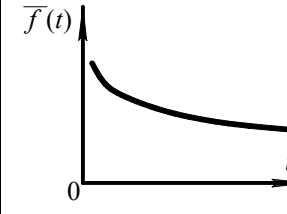
– для гіперболічної апроксимації:
$$t_i = \frac{a}{x_{ni}^{ni} - b}, i = 1, \dots, N_x; \quad (2.29)$$

– для експоненціальної апроксимації:
$$t_i = \ln \frac{x_{ni}^{ni} - b}{a}, i = 1, \dots, N_x, \quad (2.30)$$

де x_{ni}^{ni} – граничні значення параметру; a, b – коефіцієнти в рівняннях регресії; N_x – число параметрів, що контролюються; c – коефіцієнт в параболічному рівнянні регресії.

Верхнє або нижнє граничне значення параметра обирається виходячи з умови, згідно з яким отриманий час має бути позитивним.

Таблиця 2.3 – Апроксимуючі функції, їх графіки та формули для обчислення постійних коефіцієнтів

Функції	Формули для визначення постійних коефіцієнтів	Графіки
1	2	3
$\bar{f}(t) = at + b$	$a = \frac{n \sum_{i=1}^n t_i x_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n x_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2};$ $b = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n t_i \sum_{i=1}^n t_i x_i}{n \sum_{i=1}^n t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n t_i \right)^2}.$	
$\bar{f}(t) = at^2 + bt + c$	$a \sum_{i=1}^n t_i^4 + b \sum_{i=1}^n t_i^3 + c \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n t_i^2 x_i;$ $a \sum_{i=1}^n t_i^3 + b \sum_{i=1}^n t_i^2 + c \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n t_i x_i;$ $a \sum_{i=1}^n t_i^2 + b \sum_{i=1}^n t_i + cn = \sum_{i=1}^n x_i.$	
$\bar{f}(t) = \frac{a}{t} + b$	$a = \frac{n \sum_{i=2}^n \frac{x_i}{t_i} - \sum_{i=2}^n \frac{1}{t_i} \cdot \sum_{i=2}^n x_i}{n \sum_{i=2}^n \frac{1}{t_i^2} - \left(\sum_{i=2}^n \frac{1}{t_i} \right)^2};$ $b = \frac{\sum_{i=2}^n \frac{1}{t_i^2} \cdot \sum_{i=2}^n x_i - \sum_{i=2}^n \frac{1}{t_i} \cdot \sum_{i=2}^n \frac{x_i}{t_i}}{n \sum_{i=2}^n \frac{1}{t_i^2} - \left(\sum_{i=2}^n \frac{1}{t_i} \right)^2}.$	
$\bar{f}(t) = ae^{-t} + b$	$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i \cdot e^{-t_i} - \sum_{i=1}^n e^{-t_i} \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n e^{-2t_i} - \left(\sum_{i=1}^n e^{-t_i} \right)^2};$ $b = \frac{\sum_{i=1}^n e^{-2t_i} \cdot \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot e^{-t_i} \cdot \sum_{i=2}^n e^{-t_i}}{n \sum_{i=1}^n e^{-2t_i} - \left(\sum_{i=1}^n e^{-t_i} \right)^2}.$	

Позначення в табл.2.3: n – число проведених вимірів на еталонному зразку; t – час вимірювання; x_i – значення параметра в i -тий момент часу; a, b – коефіцієнти в рівняннях регресії; c – коефіцієнт в параболічному рівнянні регресії.

2. Обчислюється середній час (середнє арифметичне значення) t_{cp} і середньоквадратичне відхилення середнього часу σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (t_i - t_{cp})^2}{N - 1}}, \quad (2.31)$$

де N – число контрольованих параметрів.

3. Обчислюється мінімальний час за формулою:

$$t_{\min} = t_{cp} \cdot \frac{\sigma^\gamma}{\sqrt{N}}, \quad (2.32)$$

де γ – коефіцієнт Стюдента, який залежить від довірчої ймовірності і числа вимірювань контрольованих параметрів.

Якщо мінімальний ресурс менше нуля, то найбільше значення часу відхиляється і повторюється обчислення середнього часу і мінімального терміну експлуатації для решти значень часу, при цьому N зменшується на одиницю до тих пір, поки мінімальний термін експлуатації не вище нуля.

4. Оскільки випробування проводяться за умов прискореного старіння, коефіцієнт прискорення обчислюється за формулою:

$$K_t = \exp \left(11600 \cdot X_{cp} \frac{(X_{випр} - X_{екс})}{X_{випр} \cdot X_{екс}} \right), \quad (2.33)$$

де X_{cp} – граничне значення вимірюваної характеристики, виходячи за яке отримане значення перевищить допустиму похибку; $X_{випр}$ – вимірювана характеристика, отримана внаслідок еталонного випробування; $X_{екс}$ – вимірювана характеристика, отримана внаслідок експлуатації.

5. Мінімальний ресурс виробу з урахуванням прискореного старіння визначається за формулою:

$$t_{pec} = t_{\min} \cdot K_t. \quad (2.34)$$

Після обчислення терміну експлуатації зонду АСМ пропонується порівняти отриманий результат з необхідним часом роботи і, якщо він виходить незадовільним, обчислюється мінімум автокореляційних функцій по кожному контрольованому параметру та видається рекомендація наскільки треба продовжити випробування і з якою частотою робити вимірювання характеристик.

Автокореляційна функція розраховується за формулою:

$$K_t = \frac{1}{(N-1) \cdot D} \sum_{i=1}^n (x_{ki} + (a_k t_{ki} - b_k))(x_{km} + (a_k t_{km} - b_k)), \quad (2.35)$$

де $k = 1, \dots, N$; N – число контрольованих параметрів; n – число вимірювань кожного з параметрів; $m = 1, n$ – зміщення функції; a_k, b_k – коефіцієнти в рівнянні регресії в певні моменти часу; t_{km} – крок зсуву за часом; x_{km} – параметр, зміщений на один крок; D – дисперсія.

Дисперсія обчислюється за формулою:

$$D = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^n (x_{ki} + (a_k t_{ki} - b_k))^2, \quad (2.36)$$

6. Для кожного контрольованого параметру підбирається перший мінімум автокореляційної функції (номер вимірювання, при якому отримується цей мінімум). Потім знаходиться певний середній номер вимірювання для усіх контрольованих параметрів, при якому спостерігається мінімум усіх автокореляційних функцій. Іншими словами, слід знайти номер вимірювання, який найменше пов'язаний з іншими. При продовженні випробувань має сенс проводити "некорельовані" вимірювання з інтервалом часу, що дорівнює τ , а число вимірювань має становити M :

$$\tau = i_{\min} \cdot \frac{t_n}{n}; \quad M = n - \frac{n}{i_{\min}}, \quad (2.37) - (2.38)$$

де i_{\min} – номер вимірювання, при якому K_t є мінімальним; t_n – час останнього вимірювання; n – число вимірювань.

Остаточно, для автоматизації процесу прогнозування терміну

експлуатації зонду АСМ автором дисертаційного дослідження розроблено програму на мові програмування математичного процесору MathLab.

2.2.6. Алгоритм проведення комплексного експериментально-теоретичного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки методом атомно-силової мікроскопії

На основі розробленого комплексу методик складено узагальнений алгоритм проведення контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ методом АСМ, рис.2.11 [31].

Проведення комплексного експериментально-теоретичного контролю починається із включення приладу та налаштування модуля детектування в послідовності наведених в п.2.2.1, далі – в панелі “Area” управляючої програми обирається розмір та місце розташування ділянки на досліджуваному зразку на якій буде проводитися процес контролю геометричних та механічних характеристик. Після цього, в панелі “Main” обирається режим роботи пристрою – динамічний, налаштовуються значення амплітуди та частоти коливань; в панелі “FvsD” будується розподіл робочих частот сканування за законом нормального розподілу і обирається значення частоти – максимально наближеної до резонансної. Далі проводиться діагностування обраної ділянки в динамічному режимі з метою виявлення та усунення артефактів поверхні, а також підбору робочих параметрів режиму контролю. Після завершення попереднього сканування, робота АСМ переводиться в основний – статичний режим роботи.

Наступний етап – визначення наявності покриття та його товщини на зразку. Для цього використовується режим статичної силової спектроскопії за послідовністю наведеною в п.2.2.2. За результатами отриманими з графіка функції статичної силової спектроскопії визначають наявність покриття.

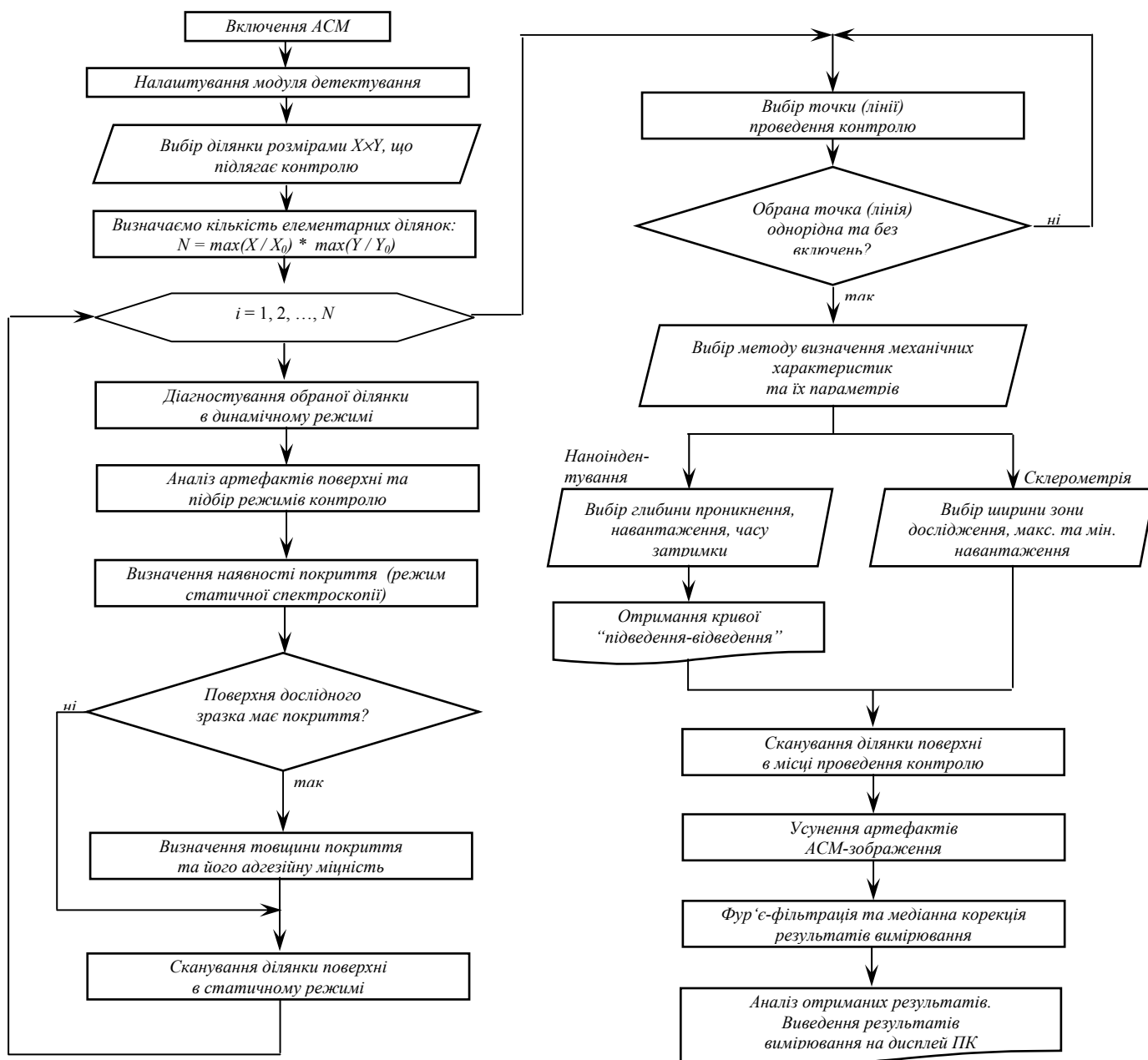


Рисунок 2.11 – Алгоритм проведення комплексного контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ методом АСМ

Товщина покриття h визначається, як відстань між нормаллями, що опускаються із середини відрізка, який з'єднує точку початку дії сили міжмолекулярної взаємодії між зондом та поверхнею (початок силової взаємодії між атомами зонда та поверхні) та точку, де дія сили Лондона та сили Ленарда-Джонса урівноважені (встановлена максимальна силова взаємодія між атомами зонда та поверхні).

Якщо зразок, що підлягає контролю має покриття, подальші

дослідження проводяться за методикою, описаною в п.2.2.2. В іншому випадку – дослідження проводяться за методикою, наведеною в п.2.2.1. Для цього проводять попереднє сканування ділянки поверхні в обраному режимі з подальшим обранням точки (для визначення мікротвердості поверхні методом наноіндентування), або лінії (для визначення зносостійкості поверхні та коефіцієнта тертя методом склерометрії) проведення контролю. Також проводиться візуальна перевірка обраних елементів на однорідність та відсутність мікродфектів та сторонніх включень, а також артефактів поверхні, які можуть впливати на результати контролю механічних характеристик. Вибір точки проникнення зонду проводиться в панелі “Area”. Для цього точка проникнення (початок та напрямок лінії – для склерометрії) вказується вручну або задається у відповідних графах панелі у вигляді координат переїзду зонда у вказане місце. У випадку, коли обрана точка/лінія не влаштовує за будь-яких причин оператора, проводиться повторна процедура обрання місця контролю механічних характеристик.

При вдалому виборі області контролю механічних характеристик проводиться вибір методу визначення механічних характеристик та їх параметрів.

У випадку, якщо оператор обирає режим “наноіндентування” в панелі “Main” управляючої програми, обирається значення глибини проникнення, максимальне значення та закон навантаження на зонд, а також час затримки, який має співпадати або перевищувати час механічної релаксації поверхні. Після цього, в панелі “FvsD” будується крива “підведення-відведення” зонду до поверхні по якій визначається положення середньої лінії профілю.

В іншому випадку (коли обрано режим “Склерометрія” в панелі “Main”), обирається ширина зони проведення дослідження на зносостійкість, максимальне та мінімальне значення навантаження на зонд.

Подальша процедура дослідження однакова для обох режимів і полягає у наступному. Проводиться сканування ділянки поверхні в місці проведення випробувань в автоматичному режимі з подальшою математичною обробкою

результатів контролю (див. п.2.2.3): усунення артефактів АСМ-зображення, його Фур'є-фільтрація та медіанна корекція.

Після проведення наноіндентування (рекомендується проводити дослідження не менше ніж у 3-5 місцях досліджуваної ділянки) обов'язково проводиться сканування рельєфу поверхні, а після цього, з паузою у 2-3 хвилини, – ще одне. Це робиться для того, щоб урахувати динаміку відновлення місця проникнення зонду в поверхню від дії пружних сил.

Аналогічною є процедура, що йде після проведення склерометрії. Після 2-3 дослідів проведених у різних місцях, але в межах досліджуваної ділянки проводиться сканування рельєфу поверхні.

Подальший аналіз отриманих топограм проводиться за допомогою розробленого автором програмного забезпечення, рис.2.12.

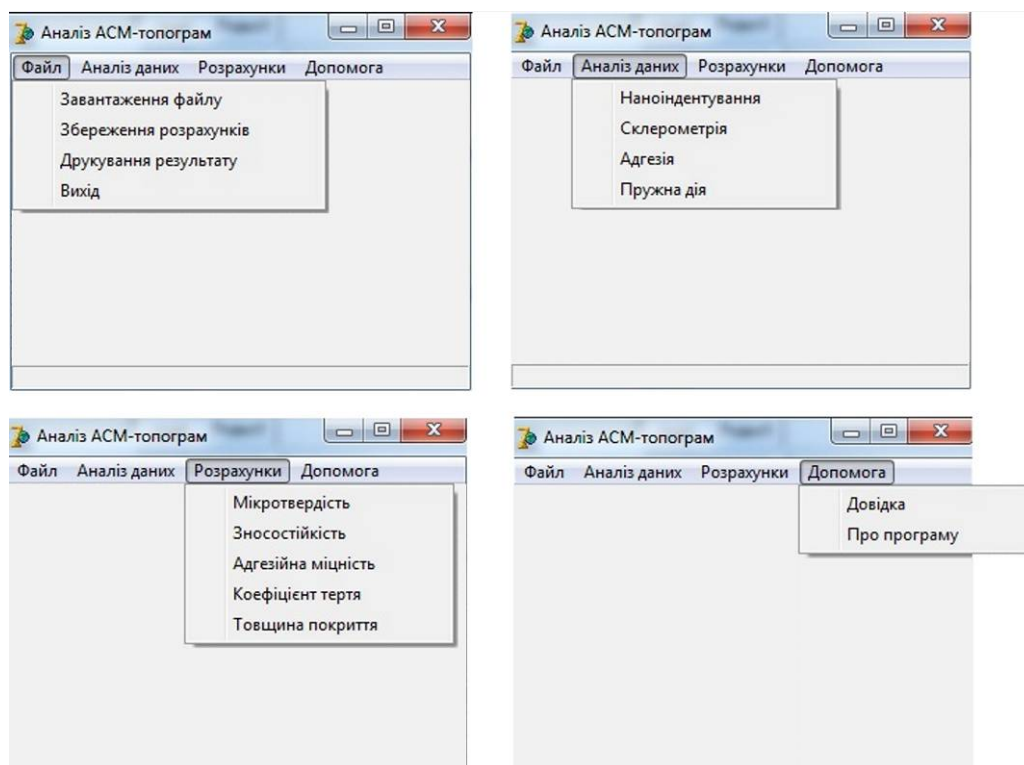


Рисунок 2.12 – Зовнішній вигляд панелей програми в якій проводиться аналіз АСМ-топограм і параметрів наноіндентування та склерометрії

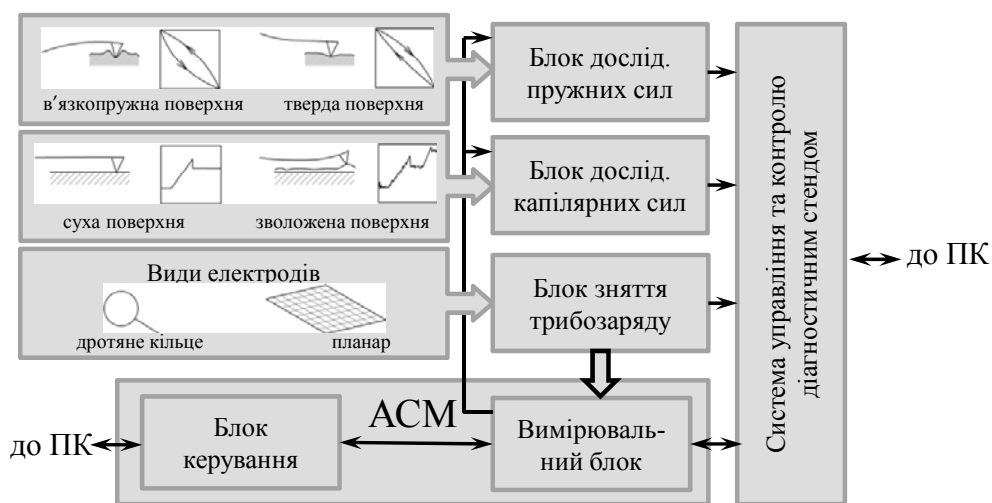
Таким чином, використовуючи розроблений методичний комплекс та складений на його основі узагальнений алгоритм, що базується на методі АСМ, можна проводити високоточний контроль та отримувати достовірні дані про геометричні та механічні характеристики компонентів МСТ.

2.3. Основні характеристики, принцип дії та результати роботи вимірювального станду

Для визначення характеристик в зоні взаємодії зонду АСМ з досліджуваними поверхнями, автором розроблено вимірювальний стенд [32], загальний вигляд та функціональна схема якого наведена на рис.2.13, а його вимірювальні характеристики – в табл.2.4.



а.



б.

Рисунок 2.13 – Зовнішній вигляд (без захисної кришки) (а) та функціональна схема (б) вимірювального станду

Таблиця 2.4 – Вимірювальні характеристики станду

Вимірювальні характеристики	Діапазон значень	Відносна похибка вимірювання, %
Трибозаряд, $\times 10^{-3}$, Кл	19 – 25	$\pm (2,7 - 5)$
Капілярні сили, $\times 10^{-12}$, Н	0,2 – 6500	$\pm (5 - 7,5)$
Пружні сили, $\times 10^{-12}$, Н	2 – 10800	$\pm (3 - 4,5)$

Вимірювальний стенд дає можливість здійснювати випробування силових характеристик в широкому діапазоні їх значень.

Основним елементом вимірювального стенду є розроблена автором система управління та контролю, що включає три вимірювальні блоки:

- блок дослідження пружних сил, визначення яких відбувається за кривою “підведення – відведення” зонду до поверхні. За характером цієї кривої робиться висновок про значення коефіцієнта пружності;

- блок дослідження капілярних сил призначений для визначення сил, що виникають між зондом та зволоженою поверхнею за залежністю “сила – відстань до поверхні”. За кривизною цієї поверхні, а також за кількістю різких спадів силової характеристики визначається капілярна сила;

- блок зняття трибозаряду призначений для фіксування електричного заряду, що виникає внаслідок тертя зонду по діелектричній поверхні. Приймачем в цьому блоці є електроди, які можуть бути як накладеними на діелектричну поверхню у формі кільця, так і у вигляді планару – металевої сітки, нанесеної методом термовакуумного осадження, на випробуваний діелектрик.

Вимірювані величини знаходяться в діапазоні значень, що повністю перекриває діапазон їх теоретичних (розрахункових) значень [33].

Випробовування вимірювального стенду проводилися при дослідженні таких фізичних характеристик поверхонь, як пружні та капілярні сили, а також залишкового трибозаряду на поверхні діелектричних зразків. Перевірка результати експериментальних досліджень проведених за допомогою стенду відбувалася порівнянням з теоретичними розрахунками. Встановлено, що вплив, який чинять пружні сили від дії зонду на поверхню зразків не перевищував значень $(7,46 - 10,76) \cdot 10^{-12}$ Н, тоді, як значення капілярних сил знаходилися в діапазоні $(110 - 230) \cdot 10^{-12}$ Н. Значення залишкового трибозаряду на поверхні діелектричних матеріалів після повного циклу сканування поверхні становило $(10,11 - 11,98) \cdot 10^{-3}$ Кл. Отримані дані корелюють з даними, отриманими в результаті проведених

теоретичних розрахунків в роботах [32] – [35] (коефіцієнт кореляції r – не менше 0,88), чим підтверджується висока точність та достовірність роботи вимірювального стенду.

Таким чином, розроблений стенд для вимірювання характеристик в зоні взаємодії зонду АСМ з досліджуваними поверхнями, дозволяє з високою точністю визначати такі фізичні характеристики поверхонь, як: дія пружних та капілярних сил, а також залишковий трибозаряд на діелектричних поверхнях. При цьому, похибка визначення залишкового трибоелектричного заряду не перевищувала 5%, капілярних сил – 7,5 %, пружних сил – 4,5%. Це дозволяє зробити висновки про оперативне та якісне визначення таких фізичних характеристик діелектричних матеріалів, як: заряд, що накопичується в поверхні внаслідок тертя, капілярні сили, які виникають між зондом АСМ та досліджуваною поверхнею або тонким покриттям на ній (що, в свою чергу, дозволяє визначати адгезійну міцність поверхневих шарів або тонких покриттів нанесених на поверхню), а також пружні сили, що дозволяють визначати модуль пружності, коефіцієнти тертя тощо.

2.4. Висновки до розділу

У розділі представлено методичне забезпечення для проведення комплексних теоретично-експериментальних досліджень методом АСМ, яке включає стандартні та оригінальні методики вимірювання та контролю параметрів мікрогеометрії та механічних характеристик поверхонь матеріалів, а також вимірювальний стенд, розроблений автором.

Методичне забезпечення, запропоноване автором містить:

- комплекс наукових методик для вимірювання та контролю характеристик компонентів МСТ методом АСМ (комплексного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ; визначення

характеристик поверхневого шару матеріалів та тонких покриттів на них);

- комплекс теоретично-розрахункових методик обробки АСМ-зображень пристроїв МСТ (математичної обробки результатів дослідження поверхні матеріалів; оптимізації режимів вимірювання; прогнозування терміну експлуатації зонду АСМ);

- вимірювальний стенд для вимірювання характеристик в зоні взаємодії зонду АСМ з досліджуваними поверхнями.

На основі розглянутих методик складено алгоритм проведення комплексного контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ методом АСМ, що дозволяє отримати високоточні (відносна похибка не перевищує 8 – 12%) та достовірні дані про мікрогеометрію поверхні та її механічні характеристики.

Таким чином, запропонований комплекс методик для проведення та математичної обробки результатів контролю методом АСМ, а також розроблений вимірювальний стенд дозволили зменшити час контролю мікрогеометрії та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ на 30 – 50%, а також зменшити кількість дефектів та артефактів сканування у 13 – 18 разів.

Список використаних джерел:

1. “Status of the MEMS industry 2016 Edition. Sample of the analysis – 2016”, *Yole Development SARL*, Lyon, France, *Rep.*, 2016.
2. В.С. Антонюк та ін., *Покриття у приладобудуванні*. Київ, Україна: НТУУ “КПІ”, 2016.
3. М.О. Бондаренко и др., “Формирование упорядоченных наноструктур на пьезоэлектрической керамике системы ЦТС термическим осаждением в вакууме”, на *X междунар. Пром. конф. Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях*, Киев, 2010, с. 159-160.
4. В.С.Антонюк, Ю.И.Коваленко, М.А.Бондаренко, та И.В.Яценко, “Модифицирование металлизированных поверхностей ленточным электронным потоком”, на *XIII Междунар. науч.-техн. конф. Инженерия поверхности и реновация изделий*, Киев, 2013, с. 15-19.
5. M. Bondarenko et. al., “Peculiarities of metalized surfaces modification of silicon elements of microelectromechanical systems with low-power electronic flow”, *Materials science. Non-equilibrium phase transformations*, year III, iss. 2, pp. 53-55, June 2017.
6. L. Singleton et al., “Analysis of the MEMSTAND survey on standardization for microsystems technology”, in *Proc. Int. Seminar MEM-STAND*, Barcelona, Spain, 2003, pp. 11-31.
7. International Organization for Standardization: TC 229 “Nanotechnologies”, 2010. [Online]. Available: http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?commid=381983. Accessed on: May 19, 2010.
8. International Electrotechnical Commission: TC 113 “Nanotechnology standardization for electrical and electronic products and systems”, 2010. [Online]. Available: http://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:0:::FSP_ORG_ID:1315. Accessed on: May 19, 2010.
9. Многофункциональный сканирующий зондовый микроскоп (атомно-силовой микроскоп), 2016. [Online]. Available: <http://microtm.com/nt206/nt206r.htm>. Accessed on: May 12, 2016.

10. Mikromasch HQ line product screencast on HQ:CSC37 & HQ:CSC38 probe series, 2016. [Online]. Available: <https://www.spmtips.com /afm-tip-hq-csc38-no-al>. Accessed on: May 12, 2016.
11. С.Д. Алекперов, “Особенности формирования АСМ-изображений при наличии слоев поверхностного адсорбата”, *Fizika-riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya*, №5, с. 8-13, 2011.
12. М.О. Бондаренко, О.В. Батраченко, В.П. Бойко, та О.В. Котляр, “Спосіб виготовлення зразка для металографічних досліджень”, *МПК Україна G 01 N 1/28. № 40531*, Квіт. 10, 2009.
13. Г.М. Дубровська та ін., *Приклади застосування фізичних методів дослідження структури поверхні*. Сільхет, Бангладеш: Шобуж Біпоні, Удоун Офсет Принтерс, 2007.
14. В.С. Антонюк и др., “Особенности измерения микротвердости диэлектрических поверхностей кремниевым зондом атомно-силового микроскопа”, *Наноинженерия*, №3 (33), с. 13-16, 2014.
15. М.О. Бондаренко, “Дослідження механічних характеристик елементів приладів точного приладобудування методом атомно-силової мікроскопії”, *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки*, №2, с. 21-28, 2015.
16. В.С. Антонюк, С.О. Білокінь, та В.О. Андрієнко, “Спосіб оцінки микротвердості”, *МПК Україна G 01 N 3/40. №87907*, Лют. 25, 2014.
17. С.О. Білокінь, В.С. Антонюк, М.О. Бондаренко, та Д.В. Тележинський, “Спосіб оцінки зносостійкості тонких покриттів”, *МПК Україна G 01 N 3/46, G 01 N 19/04. № 117635*, Черв. 26, 2017.
18. В.А. Ващенко та ін., “Діагностика функціональних шарів у виробках мікрооптики і наноелектроніки, отриманих електронними технологіями”, Черкаський держ. технол. ун-т, Черкаси, Д/б № 0106U004500, 2008.
19. Ю.І. Коваленко, М.О. Бондаренко, та Ю.Ю. Бондаренко, “Вплив режимів ультразвукового очищення п'єзоелектричних елементів на якість сформованих на їхніх поверхнях срібних електродів”, *Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”*. Машинобудування, № 64, с. 87-90, 2012.

20. М.О. Бондаренко, В.А. Ващенко, И.А. Рева, та Ю.Ю. Бондаренко, “Методика измерения толщины тонких несплошных покрытий на диэлектрических поверхностях методом атомно-силовой микроскопии”, на *XVIII междунар. конф. Современные методы и средства неразруш. контроля и технической диагностики*, Ялта, 2010, с. 209-212.
21. М.О. Бондаренко та ін., “Оцінка адгезійної міцності на стирання оксидних покриттів на оптичному склі методом атомно-силової микроскопії”, на *XII міжнар. наук.-техн. конф. Приладобудування: стан і перспективи*, Київ, 2013, с. 207.
22. С.А. Билоконь, М.А. Бондаренко, В.А. Андриенко, та В.С. Антонюк, “Исследование микротвердости тонких пленок методом наноиндентирования с помощью атомно-силовой микроскопии”, на *XIII междунар. научно-практ. конф. Качество, стандартизация, контроль: теория и практика*, Киев, 2013, с. 20-21.
23. В.С.Антонюк, М.О.Бондаренко, Ю.Ю.Бондаренко, та С.О.Білокінь, “Склерометрична оцінка зносостійкості тонких покриттів методом атомно-силової микроскопії”, на *XV Междунар. науч.-техн. конф. Инженерия поверхности и реновация изделий*, Киев, 2015, с. 17-19.
24. М.А. Bondarenko, J.J. Bondarenko, and S.A. Shelestovskaya, “Research of Influence of the State of Surface of Probes for AFM on Exactness and Quality of the Topograms”, in *Proc. XXXI Internat. Scient. Conf. Electronics and Nanotechnology*, Kyiv, 2011, pp. 60.
25. Є.Т. Володарський, та Л.О. Кошева, *Статистична обробка даних*. Київ, Україна: НАУ, 2008.
26. С.А. Билоконь, И.А. Рева, и О.В. Свиридова, “Повышение точности и срока эксплуатации зондов для АСМ” на *V міжнар. наук.-техн. конф. Сенсорна електроніка та мікросистемні технології*, Одеса, 2012, с. 112.
27. Методы оптимизации, 2016. [Online]. Available: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=MO/base.cou>. Accessed on: May 12, 2016.
28. J. Nocedal et. al., *Numerical Optimization, Springer Series in Operations Research*. Verlag, Germany: Springer, 1999.

29. А.В. Пантелеев, и Т.А. Летова, *Методы оптимизации в примерах и задачах*. Москва, Россия: Высшая школа, 2005.
30. В.О. Андрієнко, В.С. Антонюк, М.О. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко, та С.О. Білокінь, “Спосіб діагностування запам’ятовуючих пристроїв”, *МПК Україна G 06 F 11/22. № 114992*, Март 27, 2017.
31. С.О. Білокінь, та М.О. Бондаренко, “Комплексне дослідження нанометричних елементів за допомогою АСМ”, на *XII конф. студ. аспір. та мол. вчених Шевченківська весна. Частина II, фіз.-мат. науки*, Київ, 2014, с.5-6.
32. М.О. Бондаренко, Ю.Ю. Бондаренко, та С.О. Білокінь, “Діагностичний стенд для вимірювання фізичних характеристик поверхні на базі АСМ”, на *V міжнар. наук.-практ. конф. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС-2015)*, Чернігів, 2015, с. 214-215.
33. С.О. Білокінь, М.О. Бондаренко, та Ю.Ю. Бондаренко, “Дослідження фізичних характеристик діелектричних поверхонь за допомогою діагностичного стенда на базі атомно-силового мікроскопа”, *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Технічні науки*, №2 (78), с. 176-181, 2015.
34. С.А. Билоконь, М.А. Бондаренко, и В.С. Антонюк, “Влияние сил адгезии между исследуемой поверхностью и зондом для атомно-силовой микроскопии”, *Наноинженерия*, №6 (12), с. 41-45, 2012.
35. М.О. Бондаренко, С.О. Білокінь, В.С. Антонюк, та Ю.Ю. Бондаренко, “Механізм виникнення та нейтралізація залишкової трибоелектрики при скануванні кремнієвим зондом атомно-силового мікроскопу діелектричних поверхонь”, *Журнал нано- та електронної фізики*, т.6, № 2, с. 02018-1 – 02018-5, 2014.

РОЗДІЛ 3.

ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИЛОВОЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЗОНДІВ АТОМНО-СИЛОВИХ МІКРОСКОПІВ З ПОВЕРХНЯМИ МАТЕРІАЛІВ ПРИ КОНТРОЛІ ГЕОМЕТРИЧНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Наведено результати теоретичних досліджень процесів, на основі яких розроблені уточнені фізико-математичні моделі силової та енергетичної взаємодії зондів АСМ з поверхнями матеріалів на підготовчій, завершальній стадіях та стадії сканування контрольованої поверхні. Ці моделі дозволяють визначати режими стабільної роботи АСМ при контролі мікрогеометрії та механічних характеристик компонентів МСТ.

Фізико-математичне моделювання процесів силової та енергетичної взаємодії зондів АСМ з поверхнями матеріалів на підготовчій, завершальній стадіях та стадії сканування поверхні дозволяє визначати лімітуючі фактори, що негативно впливають, як на результати контролю, так і на стан зонду та поверхні.

Показано, що мінімізація таких лімітуючих факторів шляхом застосування оригінальних технічних рішень, дозволяє підвищити чутливість зонду, а також уточнити діапазон робочих параметрів сканування, чим забезпечується стабільна робота АСМ при вимірюванні і контролі механічних характеристик МСТ.

3.1. Фізичні процеси, що відбуваються в зоні взаємодії зонду атомно-силового мікроскопу з поверхнями матеріалів

При проведенні фізико-математичного моделювання взаємодії зонду АСМ з об'єктом, який підлягав процесу контролю, аналізувалися фізичні процеси в яких враховувалися силові та енергетичні складові і відбуваються при взаємодії зонду АСМ з поверхнями в реальних умовах, рис. 3.1.

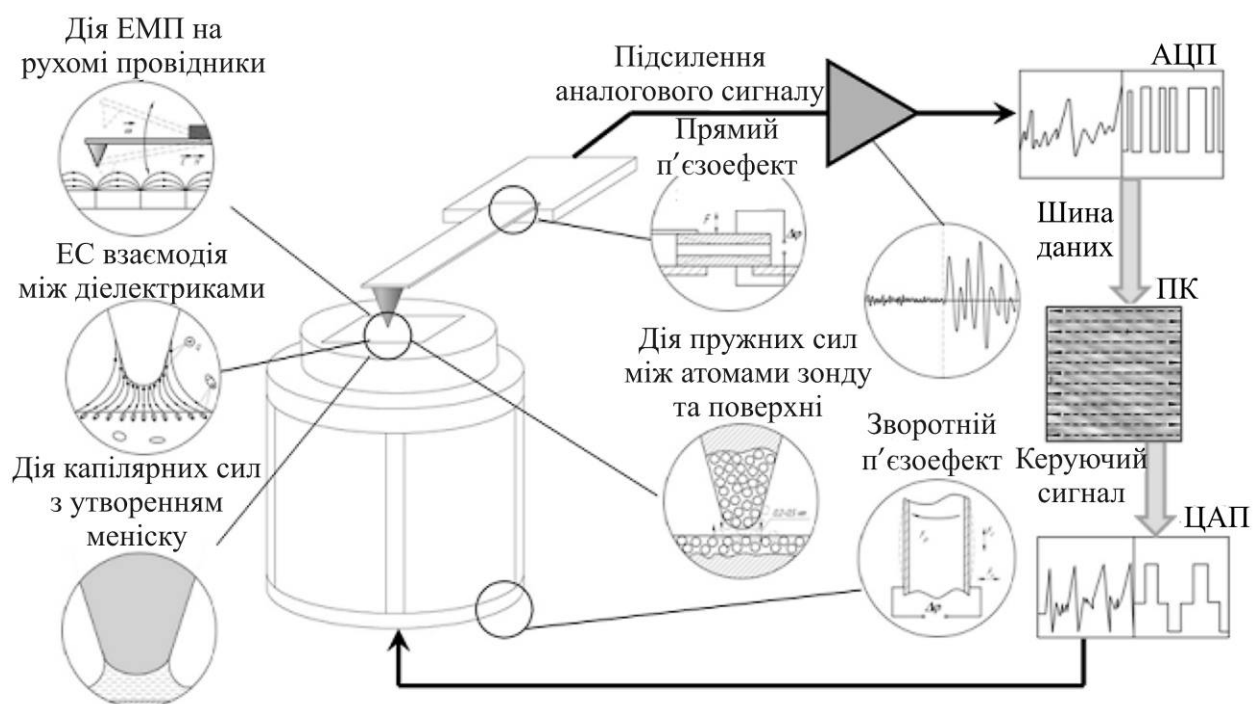


Рисунок 3.1 – Фізичні процеси, що відбуваються в АСМ при дослідженні поверхонь матеріалів

Усі фізичні процеси при цьому поділялися на ті, що відбуваються в зоні контакту зонду з поверхнею (дія пружних, капілярних та електростатичних сил, а також вплив електромагнітного поля на консоль із зондом, що рухається в процесі сканування) та такі, які виникають безпосередньо в системі сканування АСМ: прямий п'єзоефект (виникає на п'єзочипі при стискуванні або розтягненні останнього консоллю), зворотній п'єзоефект (виникає на п'єзосканері внаслідок керування обертово-поступальним рухом останнього при скануванні зразка), тощо.

Слід зазначити, якщо фізичні процеси, які виникають безпосередньо в системі сканування АСМ (наприклад, прямий та зворотній п'єзоефект), на сьогоднішній день детально досліджені, а питання зменшення похибок та зовнішніх впливів на систему сканування АСМ, а також її оптимального керування реалізуються на практиці виготовлення пристроїв нанометричного контролю (в тому числі, виробниками таких пристроїв) [1], [2]. При цьому процеси, що відбуваються в зоні контакту зонду з досліджуваною поверхнею

(особливо енергетичні) є мало вивченими і обмежуються відомими законами, що формулюються на законах класичної фізики для макрооб'єктів [3], [4].

Тому, в даному розділі проводиться математичне моделювання силової та енергетичної взаємодії зонду АСМ з поверхнями досліджуваних об'єктів. В якості таких об'єктів обрано моделі провідних (на прикладі золота Au-998) та діелектричних (на прикладі полікристалічного (h-Si) кремнію марки Kp0) зразків ($30 \times 30 \times 0,5$ мм) з атомарно-гладкою поверхнею. В якості інструменту використано п'єзочип марки CSC38/No Al (виробник: "Micromash", Німеччина) з конічним зондом із монокристалічного (n-Si(111) кремнію, радіусом вістря 8 нм, кутом на вістрі 40° , довжиною 12 – 18 мкм.

3.1.1. Схеми силових та енергетичних зв'язків у блоці контролю атомно-силового мікроскопу

При дослідженні механізму силової взаємодії, контактні сили описувались в рамках теорій класичної механіки суцільних середовищ, контактної взаємодії в наносистемах, а також міжмолекулярної та електромагнітної взаємодії. За видом дії між окремими елементами блоку контролю АСМ, сили поділяли на безконтактні (сили міжмолекулярної F_{mv} та електромагнітної F_{em} взаємодії), поверхневі (капілярна сила F_k , сила тертя $F_{тер}$, сила електростатичної взаємодії F_{ec}) та контактні (сила пружності $F_{пр}$, сила деформації зонду F_d , сила адгезії F_{ad} та сила електростатичної взаємодії F_{ec}) (рис.3.2).

Для спрощення розрахунків силової взаємодії, будемо вважати, що відбувається лише нормальна взаємодія між зондом та досліджуваною поверхнею, тобто дія усіх сил спрямована вздовж напрямку підведення зонду АСМ до досліджуваного матеріалу. При цьому, нехтується вплив таких дисипативних сил, як сили тертя при прослизанні зонду по поверхні та сил, що

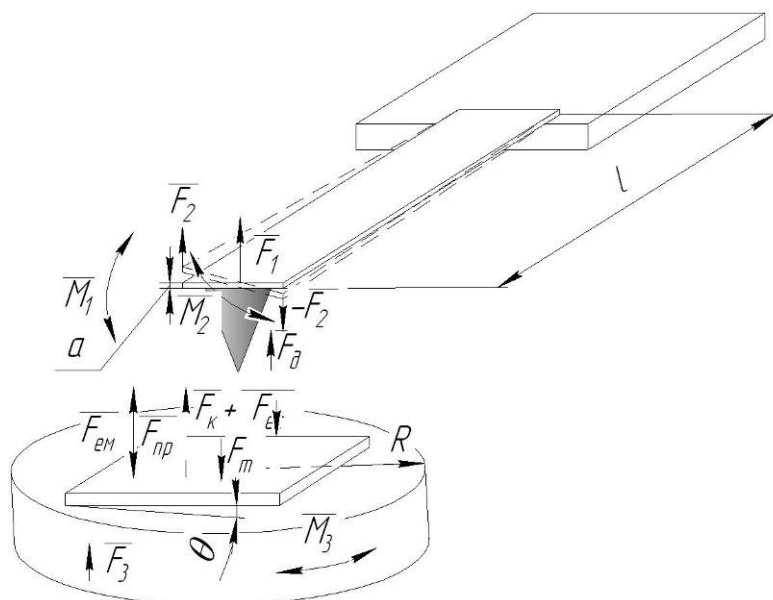


Рисунок 3.2 – Схема дії сил у блоці контролю АСМ: F_1 – сила згину консолі; F_2 – сила кручення консолі; F_3 – сила подачі п'єзосканеру; F_d – сила деформації зонду; F_k – капілярна сила; F_m – сила тяжіння; F_{ec} – сила електростатичної взаємодії; F_{em} – сила електромагнітної взаємодії; F_{np} – сила пружності; a , l – відповідно, товщина та довжина консолі; R – радіус п'єзосканера; M_1 – момент сил згину консолі; M_2 – момент сил кручення консолі; M_3 – момент сил кручення п'єзосканеру; θ – відхилення верхньої поверхні досліджуваного зразка від горизонтальної площини, мкм

виникають при згинанні консолі та викликають появу в останній внутрішніх механічних напружень. При цьому, фізичний зміст цих сил буде враховано у відповідних виразах, що описують дію моментів сил.

Для кількісного опису діючих сил використовувалися класичні фізичні рівняння, в які вносилися поправки. Ці поправки враховували геометричні параметри моделі силової взаємодії, а також процеси, які відбуваються з матеріалами на рівні нанорозмірів.

Окрім силової взаємодії, досліджувалися процеси при енергетичних перетвореннях, що відбувалися у блоці контролю АСМ. Енергетична схема блоку контролю АСМ наведена на рис.3.3.

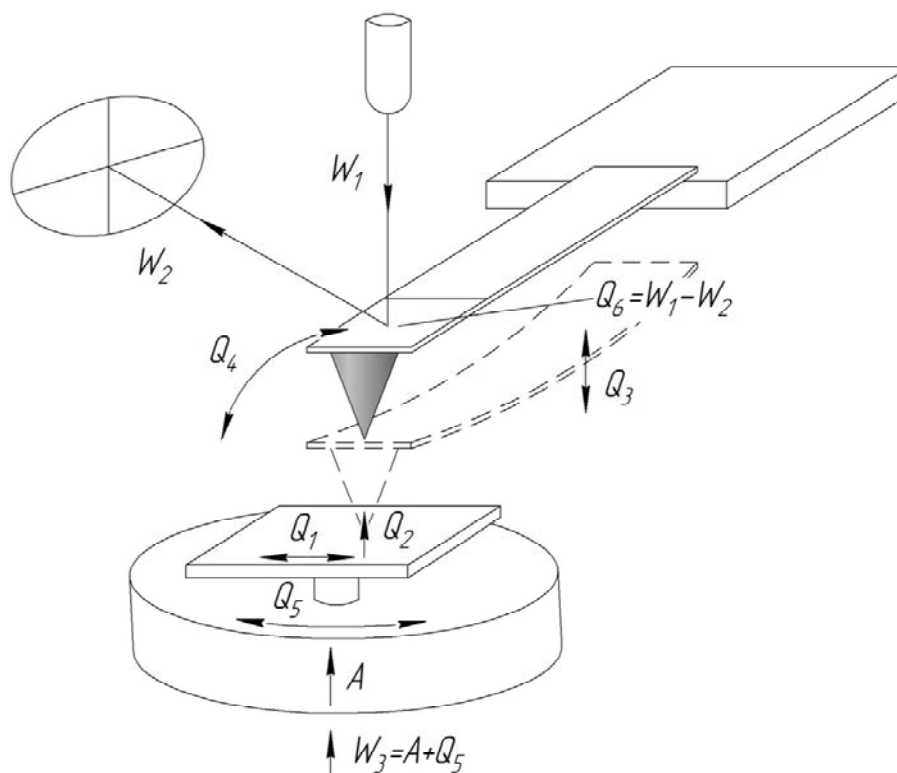


Рисунок 3.3 – Схема енергетичного обміну у блоці контролю АСМ:

Теплові витрати: Q_1 – при механічному терті зонду по досліджуваній поверхні; Q_2 – при дії електромагнітних полів та електричного заряду; Q_3 – при вигину консолі; Q_4 – при крученні консолі; Q_5 – при крученні п'єзосканера;

Енергетичний вплив: W_1 – енергія випромінювання лазерного позиціонера; W_2 – енергія лазерного випромінювання на фотодетекторі; W_3 – енергія, що подається на п'єзосканер; A – корисна робота п'єзосканера

В основі теплових розрахунків лежить комплекс нелінійних, нестационарних моделей, в якому враховується форма, розміри та теплофізичні характеристики конструктивних елементів блоку контролю та досліджуваних об'єктів [5]. При цьому враховувався лише теплообмін теплопередачею (конвективний та променевий види теплообміну не розглядалися в силу їхньої незначності).

3.1.2. Розрахунок силової взаємодії зонду атомно-силового мікроскопу з поверхнями матеріалів

В результаті ретельного вивчення фізичних процесів, що виникають в АСМ, було встановлено, що домінуючою є саме силова взаємодія зонду АСМ зі зразком (див. рис.3.2), де усі сили було поділено на: сили взаємодії між зондом та поверхнею (сила електромагнітної взаємодії; сила пружної взаємодії; сила капілярної взаємодії; сила електростатичної взаємодії; сила механічного деформування зонду), сили, що діють на консоль (сила тяжіння системи «зонд – консоль», сили кручення та згину консолі) та зовнішні сили (сила подачі п'єзосканеру).

Сила міжмолекулярної взаємодії (сила Ван-дер-Ваальса). Сила Ван-дер-Ваальса – це сила міжмолекулярної взаємодії, що включає три механізми, які мають різну фізичну природу (взаємодія, обумовлена обертанням перманентних молекулярних диполів – сила Кеєзона; взаємодія перманентних диполів з індукованими диполями нейтральних атомів та молекул – сила Дебая; взаємодія обумовлена флуктуаційними дипольними моментами – сила Лондона) і залежить від відстані між молекулами (r) [6]: $F_{mv} \equiv r^{-7}$.

При описі міжмолекулярної взаємодії конусного зонду, що має закруглення на кінці з досліджуваною поверхнею скористаємося моделлю описаною в [7]. При цьому, сила буде рівномірно розподілена в усіх точках, розташованих по колу радіусом R (рис. 3.4) і визначатиметься за формулою:

$$F_{mv} = n \int_0^\infty 2\pi R dR \int_{x_0}^\infty dx \frac{z}{\sqrt{R^2 + x^2}} \frac{6A}{\left(\sqrt{R^2 + x^2}\right)^7}, \quad (3.1)$$

де A – постійна Гамакера [8]; n – концентрація молекул в поверхні зразка; R – радіус вістря (рис. 3.4).

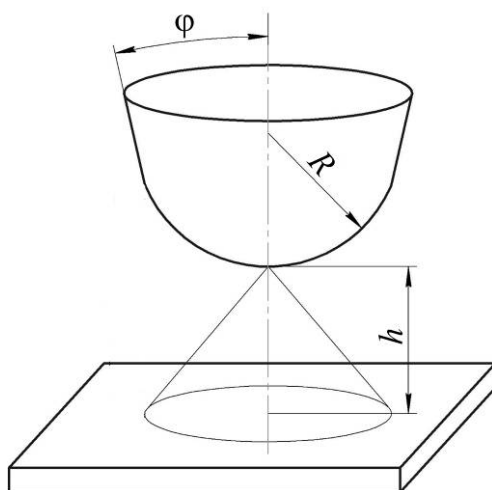


Рисунок 3.4 – Схема дії сили міжмолекулярної взаємодії між зондом і поверхнею: R – радіус вістря зонду; h – відстань між зондом і поверхнею; φ – половинний кут ухилу зонду

Тут, концентрацію молекул поверхні зразка (або зонда), що приймають участь у міжмолекулярній взаємодії можна розрахувати за формулою:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\nu N_a}{V} = \frac{m N_a \rho}{\mu \cdot m} = \frac{N_a \rho}{\mu}, \quad (3.2)$$

де N_A – стала Авогадро, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹; μ – молярна маса (для кремнію $\mu = 28$ г/моль); ρ – густина матеріалу (для кремнію $\rho = 2330$ кг/м³).

Таким чином, провівши розрахунки для кремнію за формулою (3.2) визначено, що концентрація молекул складає приблизно $n_{Si} = 2,33 \cdot 10^{22}$ м⁻³.

Далі, провівши інтегрування рівняння (3.1) для напівсферичної моделі отримується значення сили, яка виникає між зондом і зразком, рис. 3.5 [9]:

$$F_{\text{мб}} = \frac{\pi^2 n_1 n_2 A}{6h} \cdot \frac{R^2 (1 - \sin \varphi)^2 (R^2 (1 - \sin \varphi) + 3R \cdot h - R(1 - \sin \varphi) \cdot h)}{h^2 (h + R(1 - \sin \varphi))^3}, \quad (3.3)$$

де R – радіус вістря зонда; h – найменша відстань між зондом і зразком; n_1, n_2 – концентрації молекул в поверхневих шарах матеріалів зонду та зразка відповідно; A – постійна Гамакера; φ – половинний кут ухилу зонда.

Слід зауважити, що величина і напрям сили Ван-дер-Ваальса залежить від положення зонду відносно поверхні. При русі зонду у напрямі поверхні, сила взаємодії поступово зростає.

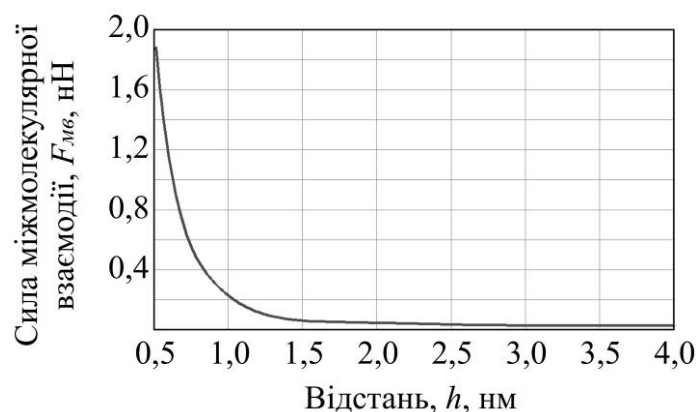


Рисунок 3.5 – Розрахункова залежність сили міжмолекулярної взаємодії (F_{mv}) від відстані (h) між зондом АСМ та досліджуваною поверхнею

Коли відстань між зондом та поверхнею набуває значення порядку 0,2 – 0,5 нм, сила Ван-дер-Ваальса змінює свій знак на протилежний і стає відштовхуючою.

Підведення зонду до досліджуваної поверхні відбувається на відстань, коли між молекулами зонду і зразка одночасно починають діяти, як сили тяжіння, так і відштовхування. Такі молекулярні короткодійчі сили призводять до виникнення явища адгезії, що унеможливорює точне знаходження сили взаємодії зонда з досліджуваною поверхнею.

При цьому, розрізняють дві схеми адгезійної взаємодії: зонд – рідка плівка на поверхні та зонд – твердий зразок. Якщо перший випадок зводиться до капілярної взаємодії, то причина адгезійних сил між зондом і твердим зразком – молекулярна електростатична взаємодія.

Розглянемо детально механізми таких взаємодій.

Сила капілярної взаємодії. При дослідженні твердих зразків в нормальних умовах зовнішньої атмосфери, на його поверхні, як правило, адсорбується шар рідини. Подальша взаємодія зонду з цією рідиною в контактному режимі роботи веде до утворення між ними сили в'язкої взаємодії, що в деяких випадках [10] значно перевищує силу міжмолекулярної взаємодії і веде до утворення меніску при підведенні, або відведення зонду до поверхні. Виникнення такої додаткової сили в'язкої

взаємодії може призвести, як до спотворення результатів дослідження, так і стати причиною передчасного виведення з ладу зонду АСМ.

В той же час, за здатністю твердих поверхонь взаємодіяти з рідиною, що осаджується на ній та значеннями крайового кута змочування θ між поверхнями рідини та твердого об'єкту, усі поверхні поділяються на гідрофобні ($0 \leq \theta < \pi/2$) та гідрофільні ($\pi/2 < \theta \leq \pi$). Визначення сил капілярної взаємодії для таких поверхонь відрізняється.

Визначення сили взаємодії гідрофільного зонду із зволоженою поверхнею (рис.3.6).

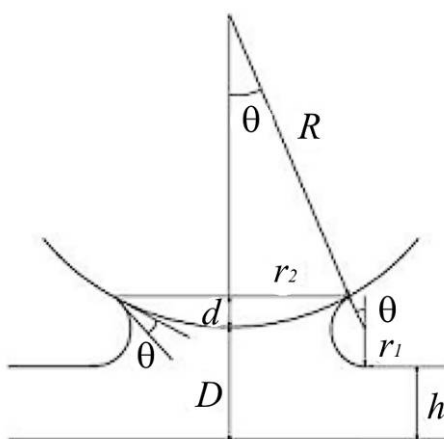


Рисунок 3.6 – Схема дії капілярних сил між вістрям зонда АСМ і поверхнею рідкої плівки: D – відстань від зонду до зразка, d – глибина проникнення зонду в шар рідини, h – товщина шару рідини, r_1 – радіус меніска рідкої поверхні, r_2 – радіус зони дотику зонду з рідиною; θ – крайовий кут змочування; R – радіус вістря зонду

Скориставшись формулою Лапласа, визначимо надлишковий тиск в рідині, який має бути меншим за атмосферний:

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \approx \frac{\sigma}{r_1}, \quad \text{за умови } r_1 \ll r_2, \quad (3.4)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягнення рідини, Н/м.

Цей тиск прикладений до поверхні дотикання зонду з плівкою рідини площею $S = \pi r_2^2 \approx 2\pi R d$. Тоді сила притягнення консолі до зразка, яка

обумовлена капілярним ефектом:

$$F_{\kappa} = \Delta p \cdot S = \frac{\pi \cdot \sigma \cdot r_2^2}{r_1} = 2\pi R d \frac{\sigma}{r_1}, \quad (3.5)$$

Враховуючи умови $r_1 \cos \theta + r_1 = D + d - h$ (для спрощення приймаємо, що крайові кути θ для зразка та зонда однакові) отримаємо:

$$F_{\kappa} = \frac{2\pi R d \sigma (1 + \cos \theta)}{d + D - h}, \quad (3.6)$$

де θ – крайовий кут змочування; R – радіус вістря зонду; D – відстань від зонда до зразка, d – глибина проникнення зонду в шар рідини, h – товщина шару рідини.

Якщо знехтувати товщиною рідкої плівки ($h=0$), то справедливим є вираз $2r_1 \cos \theta + r \approx D + d$ і формула (3.6) спрощується до вигляду:

$$F_{\kappa, \downarrow} = \frac{4\pi R d \sigma \cos \theta}{d + D}. \quad (3.7)$$

Максимальне значення капілярної сили при контакті зонду із зразком ($D = 0$), при цьому, має вигляд:

$$F_{\kappa, \downarrow} = F_{\kappa, \downarrow \max} = 4\pi R \sigma \cos \theta. \quad (3.7')$$

В цілому, якщо тіла навантажені позитивними зусиллями, адгезійні сили приводять до контакту поверхонь по області, розміри якої перевищують розміри, що передбачаються теорією Герца. При зменшенні навантаження до нульового значення поверхні залишаються з'єднаними між собою. Прикладення негативного навантаження призводить до подальшого скорочення області контакту, контакт стає нестійким і поверхні відокремлюються. Таким чином, значення сили адгезії при відриві від поверхні за теорією Джонсона-Кендала-Кобертса складає [11]:

$$F_{\kappa, \uparrow} = -3\pi R \sigma (1 + \cos \theta). \quad (3.8)$$

Визначення сили взаємодії гідрофобного зонда із зволоженою діелектричною поверхнею. При підведенні гідрофобного зонду до рідкої плівки адсорбованої на поверхні, до консолі необхідно прикласти силу достатню для проникнення зонду в шар рідини, оскільки зонд не вступає в

контакт з рідкою плівкою (рис.3.7, ділянка B-C). При цьому відбувається відштовхування зонду від рідкої плівки (рис.3.7, ділянка C-D). Подальше відведення консолі (рис.3.7, ділянка D-E) повертає її в початкове (рівноважне) положення (рис.3.7, точка F).

Визначення капілярної сили при гідрофобній взаємодії зонду з поверхнею починається зі знаходження площі тієї частини зонду, що занурена в шар рідини. В цьому випадку зонд представляється у вигляді параболоїда обертання, що задається наступним рівнянням: $y(x)=x^2/2R$, де R – радіус кривизни вістря зонду.

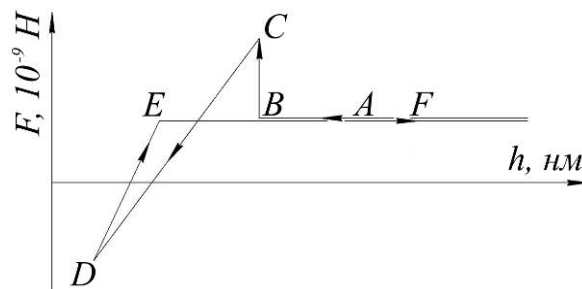


Рисунок 3.7 – Залежність сили капілярної взаємодії від відстані між зондом і досліджуваною поверхнею на етапі підведення (ділянка A-B-C-D) та відведення (ділянка D-E-F) зонду до поверхні

Тоді площа такого параболоїда обчислюється за допомогою інтегралу, що описує поверхню обертання параболі:

$$S = 2\pi \int_0^z \sqrt{2Ry \left(1 + \frac{y}{2R}\right)} dy = \frac{2\pi}{3} \left(\sqrt{R(R+2z)^3} - R^2 \right). \quad (3.9)$$

З врахуванням теоретичної моделі взаємодії гідрофобного зонду із зразком [12], що відповідає класичній задачі термодинаміки про тонку мильну плівку закріплену на дротяному каркасі з рухомою рамкою. При цьому капілярна сила взаємодії зонду з гідрофобною поверхнею становитиме:

$$F_{\kappa,\downarrow} = \sigma \frac{dS}{dz} = 2\pi\sigma\sqrt{R^2 + 2zR}, \quad (3.10)$$

а сила адгезії (пропорційна силі відриву):

$$F_{\kappa,\uparrow} = -2\pi\sigma R. \quad (3.11)$$

Підсумовуючи вищесказане, для визначення капілярної сили, яка виникає між поверхнею зонда (умовно суха поверхня) та рідкою плівкою атмосферної або природної вологи на поверхні контрольованого зразка, можна скористатися наступним уніфікованим виразом:

$$\vec{F}_\kappa = \pm 2\pi k \sigma R, \quad (3.12)$$

де R – радіус вістря зонду; σ – коефіцієнт поверхневого натягнення адсорбованої рідини; k – коефіцієнт гідрофільності зонду, що може бути визначений так:

$$k = \begin{cases} \sqrt{1 + (2 \cos \theta)^\alpha}, & \text{при гідрофільній взаємодії} \\ 1,5(1 + \cos \theta)^{\alpha-1}, & \text{при гідрофобній взаємодії} \end{cases} \quad (3.13)$$

де θ – крайовий кут змочування; α – степеневий показник, що приймає значення 2 у випадку підведення зонду до поверхні та 1 – у випадку відведення від поверхні.

Таким чином, отримане універсальне рівняння для визначення капілярної сили в залежності від характеру взаємодії зонду, рис.3.8.

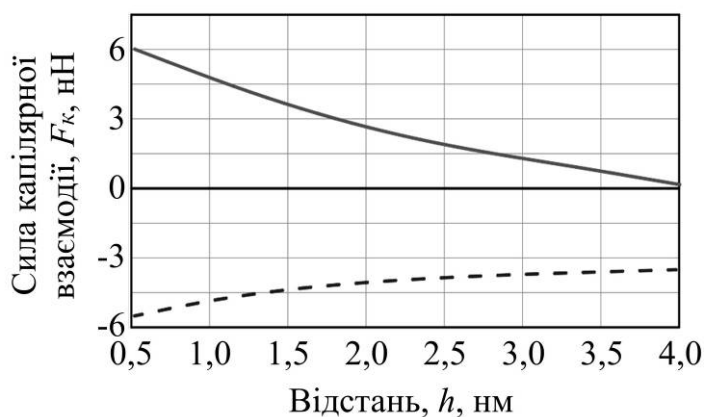


Рисунок 3.8 – Розрахункова залежність капілярної сили (F_κ) від відстані (h) при підведенні зонду АСМ до досліджуваної поверхні при гідрофільній (суцільна крива) та гідрофобній (штрихова крива) взаємодії

Значення капілярних сил взаємодії знаходяться в діапазоні $\pm(5 - 10) \times 10^{-9}$ Н, а межа механічного руйнування зонда становить порядку $140 \cdot 10^{-9}$ Н [13]. При таких зусиллях відбувається руйнування адгезиву, а руйнація зонда

є неможливою. При гідрофільній взаємодії відбувається налипання рідини на поверхню зонду, а до капілярної сили додаються дві складові: внутрішнього тертя та капілярного тяжіння, що спотворює результат сканування. При гідрофобній взаємодії такі складові будуть зневажливо малими, тому в подальших розрахунках враховуватися не будуть.

Сила пружної взаємодії. Основну взаємодію при контакті зонда з досліджуванним зразком забезпечує сила пружної взаємодії, яка може стати причиною руйнування, як зонда, так і зразка. Тому, між зондом та зразком на початковому етапі взаємодії (до початку настання пластичної деформації) поле механічних напружень можна розрахувати згідно теорії пружності, коли із збільшенням глибини проникнення зонда в зразок збільшується зсувна напруга і спостерігається зародження дислокацій, що призводить до стрибкоподібного пружно-пластичного переходу. Пружно-пластичний перехід відбувається в умовах, коли проникнення зонда відбувається по сферичній поверхні з радіусом r більшим, ніж радіус зони контакту a (рис.3.9).

Знаходження деформації при локальному зіткненні тіл під впливом навантаження F складає задачу Герца. При дії механічного навантаження дотичні тіла деформуються так, що замість точки дотику утворюється деяка контактна площадка, яка має форму кола радіусом a (рис.3.9).

Введемо зручні в розрахунках величини

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r'}, \text{ а також формулу для визначення}$$

ефективного модуля Юнга K для заданої пари матеріалів [14]:

$$\frac{1}{K} = \frac{3}{4} \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu^2}{E} \right) = \frac{3}{4} \cdot \frac{E(1-\mu_1^2) + E_1(1-\mu^2)}{E E_1},$$

звідки

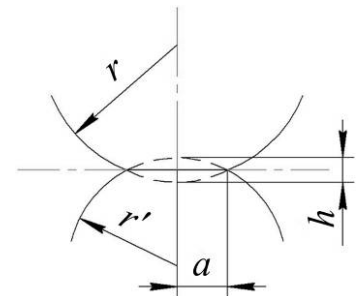


Рисунок 3.9 – Схема контакту зонда із зразком, що призводить до виникнення пружних сил

$$K = \frac{4E E_1}{3(E(1-\mu_1^2) + E_1(1-\mu^2))}, \quad (3.14)$$

де E, E_1 – модуль пружності для досліджуваного матеріалу і матеріалу зонда, відповідно; μ, μ_1 – коефіцієнт Пуассона для досліджуваного матеріалу і матеріалу зонда, відповідно.

При малих деформаціях виконується наступне геометричне співвідношення між глибиною проникнення h , радіусом кривизни зонда R і радіусом зони контакту a :

$$h = \frac{a^2}{R}. \quad (3.15)$$

Рішення задачі Герца дає наступне співвідношення між силою навантаження F та глибиною проникнення зонда h :

$$F = \frac{Ka^3}{R} = K\sqrt{h^3 R}, \quad (3.16)$$

де R – радіус кривизни зонда; F – сила, з якою навантажують зонд при його проникненні в зразок на глибину h .

З формули (3.16) виразимо радіус контактної площадки, що виникає під дією сили F :

$$a = \sqrt[3]{\frac{F \cdot R}{K}} = \sqrt[3]{\frac{3FR(E(1-\mu_1^2) + E_1(1-\mu^2))}{4E E_1}}. \quad (3.17)$$

Остаточно, розв'язуючи задачу Герца, отримаємо вираз для сили пружної взаємодії зонду АСМ з досліджуваною поверхнею, рис.3.10:

$$F_{np} = \frac{Ka^3}{R} = \frac{4E E_1 a^3}{3R(E(1-\mu_1^2) + E_1(1-\mu^2))}, \quad (3.18)$$

де a – радіус контактної площадки, що виникає під дією сили F_{np} ; E_1, E – відповідно, модуль пружності матеріалу зонда та матеріалу зразка; μ_1, μ – коефіцієнти Пуассона для матеріалу зонда і досліджуваного матеріалу відповідно; R – радіус кривизни зонда.

При цьому, слід враховувати, що час дії вістря зонду на поверхню,

тобто час, за який зонд проходить відстань, що дорівнює діаметру контакту, має бути меншим за час пружної релаксації τ : $\frac{2a}{V} < \tau$, де V – швидкість проникнення зонду в поверхню; a – радіус контактної площадки, що виникає під дією сили пружності F_{np} .

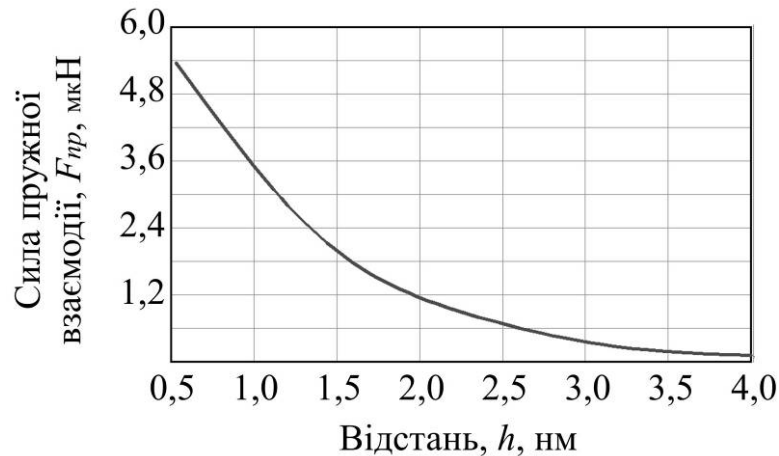


Рисунок 3.10 – Розрахункова залежність сили пружної взаємодії (F_{me}) від відстані (h) між зондом АСМ та досліджуваною поверхнею

Отже, щоб не відбувалося руйнування матеріалів, має виконуватися наступна нерівність:

$$V > \frac{2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3F_{np} \cdot R(E(1-\mu_1^2) + E_1(1-\mu^2))}{4E E_1}}}{\tau}, \quad (3.19)$$

де F_{np} – сила навантаження зонду при його проникненні в поверхню зразка; R – радіус вістря зонду; E , E_1 – відповідно, модуль пружності матеріалу зонда та матеріалу зразка; μ_1 , μ – відповідно, коефіцієнт Пуассона для матеріалу зонда і досліджуваного матеріалу; τ – час пружної релаксації.

Сила електростатичної взаємодії. При фізичному контакті двох діелектричних поверхонь (зонду та досліджуваного зразка) відбувається руйнування електричного зв'язку в атомній решітці поверхні. Це, в свою чергу, веде до вивільнення та перерозподілу зв'язаних зарядів по їх поверхням. При подальшому відведенні зонду, така нерівність розподілу зарядів зберігається [15].

Кожний наступний механічний контакт зонда з поверхнею веде до вивільнення усе більшої кількості носіїв заряду. Оскільки провідність діелектричної поверхні в нормальних умовах майже відсутня, це веде до накопичення заряду, як на поверхні зонду, так і на поверхні зразка, що сканується. З часом, це може привести до накопичення зондом або поверхнею зразка критичної кількості заряду, що, в свою чергу, приведе до спотворення результатів сканування (внаслідок зсуву зонда під дією електричного поля, що виникає в області накопичення заряду), а в окремих випадках – до електростатичного пробоя.

Виходячи з теорії електростатичної взаємодії діелектриків, основною величиною, що визначає обмін зарядами, є робота виходу електрона з середовища, що накопичує заряд. При цьому, матеріал, робота виходу у якого менша, втрачає електрони легше, а його поверхня заряджається позитивно. Відповідно поверхня з більшою роботою виходу заряджає негативно. При цьому, чим більша різниця робіт виходу, тим сильніше заряджається границя розділу. Тертя матеріалів різної електричної природи приводить до виникнення трибоелектричного ефекту, який здійснюється за такими фізичними механізмами:

- перехід електронів з металу в діелектрик;
- заряд двох діелектриків при дифузії електронів та іонів.

Істотну роль в появі трибоелектричного заряду може грати різний ступінь нагрівання тіл при їх терті, що викликано переходом носіїв заряду з локальних неоднорідностей більш нагрітої поверхні («дійсна» трибоелектрика). Причиною трибоелектрики також може служити механічне видалення ділянок поверхні піроелектриків або п'єзоелектриків.

При терті зонду по діелектричному зразку заряд розподіляється таким чином:

- при терті двох хімічно однакових матеріалів, позитивний заряд отримує матеріал з більшою густиною;
- у більшості випадків, негативно заряджають матеріали з більшою

діелектричною проникністю (правило Кена [16]);

- величина заряду прямо пропорційна силі стискання матеріалів при контакті;
- величина заряду збільшується в міру віддалення матеріалів по трибоелектричній шкалі [16];
- електризація тіл, що труться, збільшується в міру збільшення площі поверхні;
- при відносній вологості повітря більше 85% виникнення електростатичних зарядів між діелектричними поверхнями, що труться, як правило, не відбувається.

Спрощена схема розподілу електричного поля між діелектричним зондом та діелектричною поверхнею наведена на рис. 3.11.

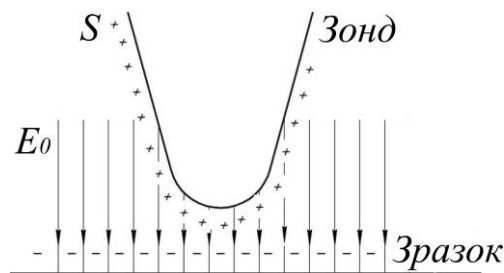


Рисунок 3.11 – Схема розподілу електростатичного поля між діелектричним зондом та діелектричною поверхнею: S – площа зони контакту діелектрика із зондом; E_0 – напруженість поля пробою

Прийmemo, що значення заряду Δq , який набувають зонд і поверхня після кожного кроку сканування, визначається умовами контакту і тертя між зондом та досліджуваною поверхнею, а швидкість сканування складає n кроків за одиницю часу. Це відповідає наступній величині струму заряджання:

$$i_c = n \cdot \Delta q. \quad (3.20)$$

Приймається, що Δq_{max} – максимальне значення заряду на визначеному кроці, який може бути оцінений так:

$$\Delta q_{max} = \epsilon_0 \cdot E_0 \cdot S, \quad (3.21)$$

де $E_0 = 3 \cdot 10^6$ В/м – напруженість поля пробою в повітрі між електродами за нормальних умов; S – площа зони контакту діелектрика із зондом.

За законом Кулона сила взаємодії двох діелектриків:

$$F_{ec} = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\epsilon_m\epsilon_0 r^2} \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_m}{\epsilon_s + \epsilon_m} \right), \quad (3.22)$$

де ϵ_m – діелектрична проникність середовища (для повітря $\epsilon_m = 1$); ϵ_0 – діелектрична постійна, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ϵ_s – діелектрична проникність зразка; q_1, q_2 – заряди, накопичені на зонді та зразку, відповідно.

Дана залежність використовується лише для ілюстрації руйнівного ефекту електростатичних сил. У реальності накопичений заряд на зонді більший, оскільки при проникненні зонда в зразок, відбувається нерівномірне руйнування диполів в поверхнях зонда та досліджуваного зразка, що приводить до вивільнення різної концентрації вільних зарядів на поверхнях, що контактують, рис.3.12:

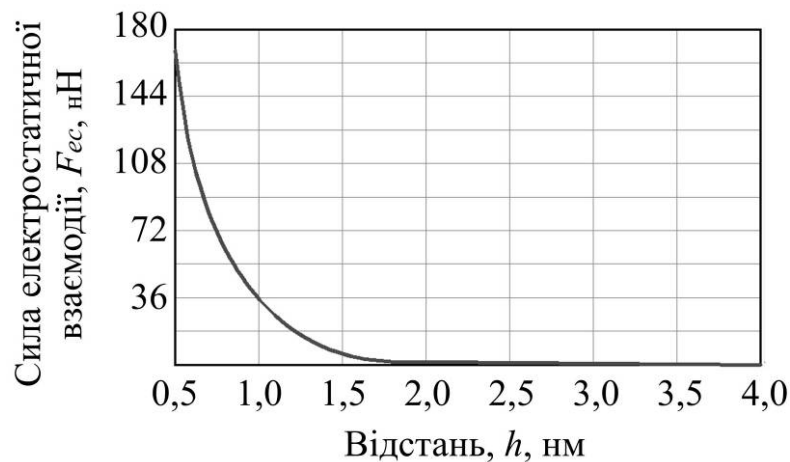


Рисунок 3.12 – Розрахункова залежність сили електростатичної взаємодії (F_{me}) від відстані (h) між зондом АСМ та досліджуваною поверхнею

$$\begin{aligned} F_{ec} &= \frac{2neV}{4\pi\epsilon_m\epsilon_0 h^2} \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_m}{\epsilon_s + \epsilon_m} \right) = \frac{2\pi R^2 ne \left(h - \frac{R}{3} \right)}{4\pi\epsilon_m\epsilon_0 h^2} \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_m}{\epsilon_s + \epsilon_m} \right) = \\ &= \frac{R^2 ne \left(h - \frac{R}{3} \right)}{2\epsilon_m\epsilon_0 h^2} \left(\frac{\epsilon_s - \epsilon_m}{\epsilon_s + \epsilon_m} \right), \end{aligned} \quad (3.23)$$

де n – концентрація носіїв заряду, м^{-3} ; e – величина носіїв заряду (в якості основних носіїв заряду в кремнії марки Кр0 приймаємо електрони,

концентрація яких у 16 – 18 разів більша за концентрацію дірок), Кл; V – об'єм каналу провідності, м³; h – мінімальна відстань між зондом та досліджуваною поверхнею, м; R – радіус вістря зонду, м.

Сила електромагнітної взаємодії, що виникає, переважно, в провідних консолях (зондах), які здійснюють вертикальні коливання при підведенні-відведенні зонда до поверхні в зоні дії електромагнітного поля, визначається виходячи із закону Біо-Савара-Лапласа: $dB = \frac{I\mu_0 dl}{4\pi r^2} \sin \alpha$ та закону Лоренца:

$dF = qBv \sin \alpha$, звідки (рис. 3.13):

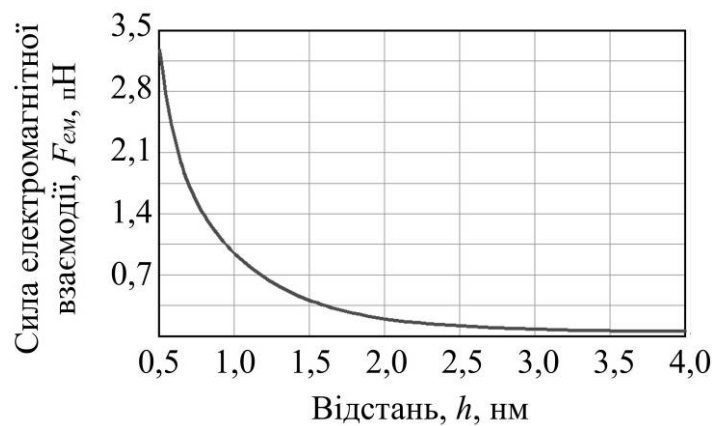


Рисунок 3.13 – Розрахункова залежність сили електромагнітної взаємодії ($F_{ем}$) від відстані (h) між зондом АСМ та досліджуваною поверхнею

$$F_{ем} = \frac{3}{16} \frac{e^3 l^2 \mu_0 v^2}{\pi^2 h^5} \cdot \sin^2 \alpha, \quad (3.24)$$

де e – величина носіїв заряду на поверхні зразка, Кл; h – відстань від зонду до поверхні, м; l – довжина консолі, м; μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 12,57 \cdot 10^{-7}$ Гн/м; v – частота коливань консолі (залежить від швидкості та кроку сканування); α – половинний кут вістря зонду; B – вектор індукції магнітного поля.

Інші сили (сили згину та кручення консолі та сила подачі п'єзосканеру) знаходяться виходячи з принципу суперпозиції сил за формулами:

$$\text{Сила згину консолі: } F_1 = F_{np} - F_{\kappa} - F_{ec} - F_{\partial} - F_m \pm F_{ем}; \quad (3.25)$$

$$\text{Сила кручення консолі: } F_2 = (F_{np} - F_m) \cos \theta - F_{\partial}; \quad (3.26)$$

$$\text{Сила подачі п'єзосканеру: } F_3 = \alpha \rho (2\pi n R)^2, \quad (3.27)$$

де α – коефіцієнт питомого видовження п'єзосканеру; n – частота обертання п'єзосканеру при скануванні; ρ – густина матеріалу п'єзосканеру; θ – відхилення поверхні досліджуваного зразка від горизонтальної площини.

Слід зауважити, що для проведення розрахунків пружної сили, сил капілярної та електростатичної взаємодії використовувалися дані отримані за допомогою розробленого вимірювального стенду (див. розд. 2.3).

Для виконання розрахунків основних сил взаємодії зонду АСМ з досліджуваними поверхнями було складено розрахунковий модуль в математичному процесорі MathCAD.

В результаті проведених розрахунків отримані залежності узагальненої сили взаємодії між зондом і досліджуваним зразком від положення зонда відносно поверхні зразка, рис. 3.14.

В результаті аналізу залежностей сил взаємодії між зондом та різними за електричною природою зразками при проникненні зонду в діелектричну та провідну поверхні зразків (приймаємо за модель процесу проникнення зонда в поверхню зразків на 10 нм) – рис. 3.14 – встановлено, що значний вплив в системі «зонд-зразок» здійснюють: сила пружної взаємодії $F_{np} = 10,8 \cdot 10^{-6}$ Н, сила електростатичної взаємодії $F_{ec} = 12 \cdot 10^{-6}$ Н, сила кручення $F_2 = 3,1 \cdot 10^{-6}$ Н, сила подачі п'єзосканеру $F_3 = 18 \cdot 10^{-6}$ Н.



Рисунок 3.14 – Залежність сил взаємодії між кремнієвим зондом та досліджуваною поверхнею: а – підведення зонда до зразка; б, в – проникнення зонда в діелектричну (б, кремній марки Кр0) та провідну (в, золото Аи-998) поверхні

Граничні розрахункові значення сил взаємодії між зондом і досліджуваною поверхнею на різних етапах приведені в табл.3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахункові значення основних сил взаємодії між зондом і досліджуваною поверхнею на різних етапах

Граничні розрахункові значення сил взаємодії							
Сила між молекулярної взаємодії, F_{mv} , Н		Капілярна сила, F_k , Н		Пружна сила, F_{np} , Н		Сила електростатичної взаємодії, F_{ec} , Н	
min	max	min	max	min	max	min	max
Підведення зонду до зразка							
$28,91 \cdot 10^{-16}$	$1,02 \cdot 10^{-11}$	$2,82 \cdot 10^{-12}$	$1,48 \cdot 10^{-10}$	—	—	$3,21 \cdot 10^{-9}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$
Сканування поверхні зразка							
$12,87 \cdot 10^{-15}$	$17,7 \cdot 10^{-10}$	$2,31 \cdot 10^{-10}$	$6,37 \cdot 10^{-9}$	$4,55 \cdot 10^{-12}$	$5,24 \cdot 10^{-6}$	$1,38 \cdot 10^{-15}$	$12 \cdot 10^{-6}$
Проникнення зонду в поверхню							
—	—	—	—	$8,92 \cdot 10^{-11}$	$7,8 \cdot 10^{-6}$	$1,71 \cdot 10^{-18}$	$2,11 \cdot 10^{-7}$
Відведення зонду від поверхні зразка							
$34,11 \cdot 10^{-16}$	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$3,41 \cdot 10^{-12}$	$3,23 \cdot 10^{-10}$	—	—	$3,44 \cdot 10^{-9}$	$1,72 \cdot 10^{-7}$

З рис.3.14 видно, що у міру наближення зонда до досліджуваної поверхні результуюча сила взаємодії починає збільшуватися на відстанях порядку 1,5 нм. Максимальне ж зусилля досягається при контакті зонда з поверхнею, що вказує на дію сили притягнення зонду рідкою плівкою і силу Ван-дер-Ваальсового тяжіння. При відведенні зонда від поверхні, блок контролю має подолати роботу по притягненню зонда до зразка, обумовлену тими ж силами. Тому графіки підведення та відведення накладаються.

Як видно із вищенаведених залежностей, на етапах підведення та відведення зонда від зразка сили взаємодії мають мінімальні значення і фактично не залежать від того, який матеріал досліджується (криві підведення та відведення на рис.3.14.а накладаються). При заглибленні зонда в діелектричний зразок найбільший вплив чинять сили електростатичної взаємодії (рис.3.14.б), тоді, як при дослідженні провідникових матеріалів ці

сили не враховуються (рис.3.14.в).

Окрім сил, у блоці контролю АСМ діє ряд механічних моментів, а саме:
 $M_1 = F_l l$ – момент згину консолі; $M_2 = 2aF_2$ – момент кручення консолі;
 $M_3 = \pi R F_3$ – момент кручення п'єзосканеру, найбільший вплив серед яких чинить момент кручення п'єзосканеру.

Таким чином, з огляду на проведені розрахунки складових силової взаємодії між діелектричним зондом та досліджуваною поверхнею було встановлено лімітуючі фактори. Серед них слід виділити наступні сили електростатичної F_{ec} і капілярної F_k взаємодії. Так, швидке зношення зонда відбувається або через накопичення електростатичного заряду внаслідок тертя кремнієвого зонда о діелектричну поверхню, або при навантаженнях на зонд більше 0,8 мН (під час наноіндентування та склерометрії). У той же час на результат сканування впливає сила капілярної взаємодії, яка на декілька порядків вища за силу Ван-дер-Ваальса (табл.3.2). Така сила не є причиною руйнування зонда, проте явище внутрішнього тертя зонда в шарі рідини, адсорбованій на поверхні зразка, спотворює результат сканування.

Тому, для підвищення точності проведення контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь, а також збільшення приведенного терміну служби зондів необхідно проводити мінімізацію та усунення цих лімітуючих чинників шляхом застосування оригінальних технічних рішень: системи видалення залишкового трибоелектричного заряду [17], а також уточнення режимів раціональної роботи блоку контролю АСМ.

3.1.3. Визначення умов контактного руйнування зонду атомно-силового мікроскопу

Визначення умов контактного руйнування чутливого елементу атомно-силового мікроскопу проводилося шляхом аналітичного розв'язання задач механіки деформованого твердого тіла, а саме: розтягування, стискування

конічного зонду та вигин і кручення консолі чутливого пристрою АСМ.

Визначення критичного навантаження на зонд АСМ. Для спрощення розв'язання даної задачі, конічний зонд поділяється на n частин однакової товщини (рис.3.15). Далі розраховується сила, яку можна прикласти до вістря зонду за умови, що експлуатація зонду здійснюватиметься до моменту, доки значення радіусу вістря зонду не перевищить 10 нм (120% від початкового розміру) [18].

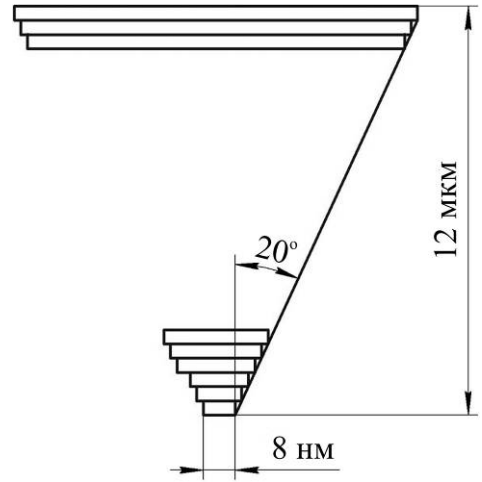


Рисунок 3.15 – Модель поділеного на n частин конічного зонду

Відомо [19], що в процесі стискування зонду починають діяти небезпечні перерізи, в яких механічні напруження досягають найбільших по модулю значень. Для цих перерізів діє наступна умова міцності:

$$\sigma_{\max} = \left| \frac{F_{\max}}{S} \right| \leq [\sigma], \quad (3.28)$$

де σ_{\max} – максимальне механічне напруження, що виникає в зонді під дією максимального навантаження; F_{\max} – максимальне навантаження на зонд; S – площа перетину зонду в небезпечному перерізі; $[\sigma] = 230$ ГПа – границя міцності кремнію на згинання.

Враховавши значення максимального значення сумарної сили взаємодії (див. табл. 3.2) $F_0 = 172 \cdot 10^{-7}$ Н, а також площу найбільш небезпечного перетину: $S = \pi R^2 \approx 3 \cdot 10^{-16}$ м², встановимо значення максимально допустимого навантаження, що призводить до руйнування зонду:

$$F_{\max} = S \cdot [\sigma] = 3 \cdot 10^{-16} \cdot 2,3 \cdot 10^{11} = 690 \cdot 10^{-7} \text{ Н} \gg F_0 = 172 \cdot 10^{-7} \text{ Н}. \quad (3.29)$$

Як видно із (3.29) максимально-допустиме навантаження при якому відбувається руйнування зонду, набагато більше за максимальне значення сумарної сили взаємодії, яка виникає між зондом АСМ та поверхнею досліджуваного об'єкту (див. п.3.1.2).

Визначення критичного вигину консолі в процесі підведення та відведення зонду до поверхні. В якості розрахункової моделі, обиралися плоска балка (консоль) з геометричними параметрами $l \times b \times h$ ($230 \times 7 \times 40$ мкм), що жорстко закріплювалася одним кінцем, інший кінець балки був вільний і до нього прикладалася критична сила, рис. 3.16.

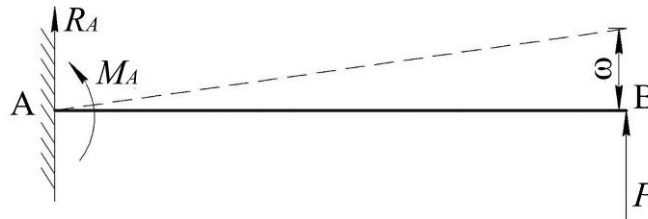


Рисунок 3.16 – Розрахункова модель задачі визначення критичного вигину консолі

На першому етапі проводився розрахунок критичної сили, що діє на консоль. Для цього знаходилися опорні реакції R_a та M_a :

$$\sum z = 0; \quad -P = R_a; \quad (3.30)$$

$$\sum m_A = 0; \quad -Pl = M_a. \quad (3.31)$$

Небезпечним перетином, очевидно, є місце закріплення балки, де буде діяти максимальний згинальний момент $M_{\max} = Pl$. Небезпечними точками в балці є верхня та нижня точки в місці закріплення, умова міцності для яких записується наступним чином:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} = \frac{Pl}{W} \leq [\sigma]. \quad (3.32)$$

Звідки:

$$P \leq [P] = \frac{[\sigma] \cdot W}{l} = \frac{230 \cdot 10^9 \cdot 3,27 \cdot 10^{-16}}{230 \cdot 10^{-6}} = 3,27 \cdot 10^{-4} \text{ Н},$$

де $[\sigma] = 230$ ГПа – границя міцності кремнію на згинання; W – осьовий

момент опору: $W = \frac{b \cdot h^3}{6} = \frac{40 \cdot 10^{-6} \cdot (7 \cdot 10^{-6})^3}{6} = 3,27 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3$; $l = 230$ мкм –

довжина балки.

Далі розрахуємо максимальний вигин балки за критичною силою, що

діє на консоль, скориставшись формулою [20], загальний вигляд якої:

$$\omega(x) = \omega_0 + \Theta_0 x + \frac{1}{EI} \cdot \left(M_0 \frac{x^2}{2!} + Q_0 \frac{x^3}{3!} + \sum M \frac{(x-a)^2}{2!} + \sum P \frac{(x-b)^3}{3!} + \sum q_c \frac{(x-c)^4}{4!} - \sum q_d \frac{(x-d)^4}{4!} \right). \quad (3.33)$$

Для нашого конкретного випадку (балка прямокутного перетину, один кінець якої жорстко закріплений, інший – вільний, що знаходиться під навантаженням P) маємо, що $\omega_0 = 0$, тоді рівняння (3.33) набуває вигляд:

$$\omega(0) = \Theta_0 \cdot 0 + \frac{1}{EI} \left(\frac{Pl^3}{6} - \frac{Pl^3}{2} \right) = \frac{Pl^3}{3EI}, \quad (3.33')$$

де I – момент інерції балки: $I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{40 \cdot 10^{-6} \cdot (7 \cdot 10^{-6})^3}{12} = 1,14 \cdot 10^{-21} \text{ м}^4$,

$l = 230 \text{ мкм}$ – довжина балки; $E = 109 \text{ ГПа}$ – модуль пружності кремнію.

Підставляючи значення для критичної сили консолі $P = 3,27 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$:

$$\omega_{\max} = \frac{Pl^3}{3EI} = \frac{3,27 \cdot 10^{-4} \cdot (230 \cdot 10^{-6})^3}{3 \cdot 109 \cdot 10^9 \cdot 1,14 \cdot 10^{-21}} = 10,67 \cdot 10^{-6} \text{ м} \approx 11 \text{ мкм}.$$

Визначення максимального згинального моменту вільного кінця балки. Розрахунок деформації консолі під дією на неї сил взаємодії зонду АСМ з поверхнею за умови виникнення крутного моменту у горизонтальній площині консолі полягає в наступному.

Визначення реакції опор. Реакції опор знаходяться з умови рівності нулю суми моментів всіх сил відносно точки опори:

$$\sum M = M_a + M = 0 \Rightarrow M_a = -M; \quad (3.34')$$

$$\sum P = R_a = 0. \quad (3.34'')$$

Знаходження крутного моменту M_{\max} . З умови міцності балки на згинання:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W} \leq [\sigma], \quad (3.35)$$

де $[\sigma] = 230$ ГПа – границя міцності кремнію на згинання; W – осьовий

$$\text{момент опору: } W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{40 \cdot 10^{-6} \cdot (7 \cdot 10^{-6})^2}{6} = 3,27 \cdot 10^{-16} \text{ м}^3.$$

Знаходимо:

$$M_{\max} = [\sigma] \cdot W = 230 \cdot 10^9 \cdot 3,27 \cdot 10^{-16} = 75,2 \cdot 10^{-6} \text{ Н/м}.$$

Визначення кута згинання балки при прикладенні крутного моменту.

Розрахунок кута згинання балки при прикладенні крутного моменту виконується за формулою [20], загальний вигляд якої:

$$Q_{(z)} = \theta_0 + \frac{1}{E \cdot I} \left[M_0 \cdot z + Q_0 \cdot \frac{z^2}{2!} + \sum_{i=1}^n M_i \cdot (z - a_i) + \right. \\ \left. + \sum_{i=1}^n F_i \cdot \frac{(z - b_i)^2}{2!} + \sum_{i=1}^n q_i \cdot \frac{(z - a_i)^3}{3!} + \sum_{i=1}^n k_i \cdot \frac{(z - d_i)^4}{4!} \right] \quad (3.36)$$

Для нашого конкретного випадку (балка прямокутного перетину, один кінець якої жорстко закріплений, інший – вільний, знаходиться під навантаженням P) маємо, що $\omega_0 = 0$, тоді рівняння (3.36) набуває вигляд:

$$Q_{(l)} = \frac{M \cdot l}{E \cdot I}, \quad (3.36')$$

$$\text{де } I - \text{момент інерції балки: } I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{40 \cdot 10^{-6} \cdot (7 \cdot 10^{-6})^3}{12} = 1,14 \cdot 10^{-21} \text{ м}^4,$$

$l = 230$ мкм – довжина балки; $E = 10^9$ ГПа – модуль пружності кремнію.

Підставляючи значення для максимального моменту $M = 75,2 \cdot 10^{-6}$ Н, отримуємо:

$$Q_{(l)} = \frac{M \cdot l}{E \cdot I} = \frac{75,2 \cdot 10^{-6} \cdot 230 \cdot 10^{-6}}{109 \cdot 10^9 \cdot 1,14 \cdot 10^{-21}} = 40,8^\circ.$$

Розрахунок деформації консолі під дією на неї сил взаємодії зонду АСМ з поверхнею за умови виникнення крутного моменту у вертикальній площині проводиться наступним чином. Консоль АСМ часто зазнає деформацію під дією згинального моменту. При цьому слід зазначити, що

дотичні напруження при крученні напрямлені по дотичній до контуру (рис.3.17).

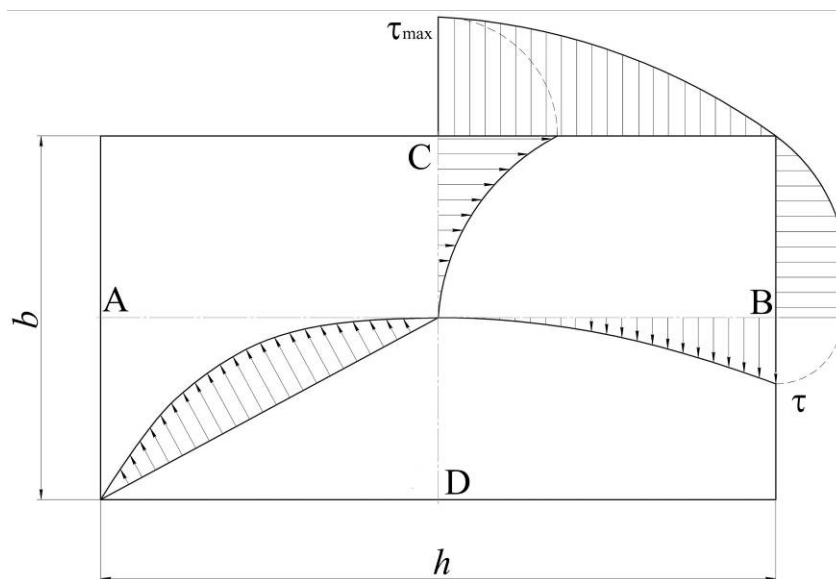


Рисунок 3.17 – Розподіл дотичних напружень по перерізу прямокутної балки

Як видно з епюри (рис. 3.17), найбільші напруження виникають біля поверхні посередині довгих сторін прямокутного перерізу (в точках C і D), які можна визначити за формулою:

$$\tau_{\max} = \frac{M_{\max}}{\alpha h b^2} \leq [\tau], \quad (3.37)$$

де α - коефіцієнт, що залежить від співвідношення сторін h і b (для нашого випадку, $h/b = 5,71$, тоді $\alpha = 0,299$); M_{\max} – максимальний крутний момент ($M_{\max} = 75,2 \cdot 10^{-6}$ Н); $[\tau] = 93$ ГПа – граничні значення дотичних напружень для кремнію.

Таким чином, найбільші дотичні напруження:

$$\tau_{\max} = \frac{75,2 \cdot 10^{-6}}{0,299 \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot (7 \cdot 10^{-6})^2} = 12,8 \cdot 10^9 \text{ ГПа} < [\tau] = 93 \cdot 10^9 \text{ ГПа}.$$

Із останньої нерівності встановлено, що максимально-допустимі значення дотичних напружень для кремнію для яких відбувається

руйнування зонду, набагато більше за максимальне значення дотичних напружень, що виникають по перерізу прямокутної балки.

Остаточно визначимо повний кут закручення балки:

$$\varphi = \frac{M_{кр} \cdot l}{\beta h b^3 G} = \frac{[\tau] \cdot \alpha \cdot l}{\beta \cdot b G}, \quad (3.38)$$

де α , β - коефіцієнт, що залежить від співвідношення сторін h і b (для нашого випадку, $h/b = 5,71$, тоді $\alpha = \beta = 0,299$); $[\tau] = 93$ ГПа – граничні значення дотичних напружень для кремнію; $l = 230$ мкм – довжина балки; $G = 799 \cdot 10^9$ ГПа – модуль зсуву балки.

Тоді повний кут закручення:

$$\varphi = \frac{[\tau] \cdot \alpha \cdot l}{\beta \cdot b G} = \frac{93 \cdot 10^9 \cdot 0,299 \cdot 230 \cdot 10^{-6}}{0,299 \cdot 7 \cdot 10^{-6} \cdot 799 \cdot 10^9} = 39,2^\circ$$

В результаті визначення умов контактного руйнування зонду АСМ проведено розрахунки та зроблено наступні висновки:

– в результаті аналітичного розрахунку критичного навантаження на зонд з боку поверхні встановлено, що при дослідженні поверхні з максимальним відхиленням мікрорельєфу піків 11 мкм, критичне навантаження, що буде діяти на кремнієвий зонд становитиме $F_{max} = 690 \cdot 10^{-7}$ Н;

– при порівнянні критичних навантажень, що діють на зонд і реальних сил взаємодії було показано, що кремнієві конічні зонди марки CSC38 при експлуатації їх в контактному режимі за визначених умов та режимів дослідження повністю задовольняє вимог по міцності при скануванні та наноіндентуванні різних матеріалів.

3.2. Фізико-математичне моделювання процесу нагрівання у блоці контролю атомно-силового мікроскопу при дослідженні пристроїв мікросистемної техніки

Проведення теплових розрахунків полягає у складанні та аналітичному

розв'язанні математичних моделей процесу нагрівання окремих елементів блоку контролю АСМ в процесі проведення досліджень із залученням методу зворотного інтегрального перетворення Фур'є [21].

Серед елементів АСМ, для яких проводилися теплові розрахунки обрано основні чотири, в яких відбувається максимальне виділення теплоти в процесі роботи блоку контролю, а саме [5]: досліджуваний об'єкт, вістря зонду, консоль блоку контролю, п'єзоелектричний сканер.

3.2.1. Математична модель процесу нагрівання пластини великої товщини (досліджуваний об'єкт)

Тепловий вплив на досліджуваний об'єкт (зразок) здійснюється шляхом фізичного тертя зонду АСМ по його поверхні в процесі сканування цього зразка в контактному режимі. Сумарний тепловий потік вважається рівномірно розподіленим в зоні дослідження по поверхні зразка, рис.3.18.

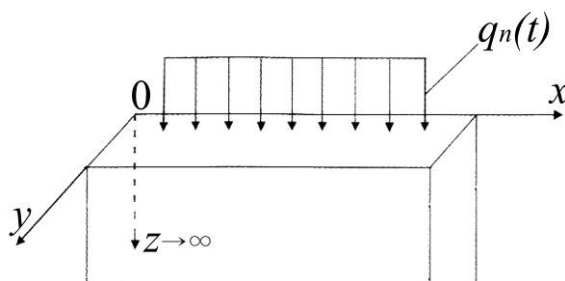


Рисунок 3.18 – Схема нагрівання робочої поверхні зразка:

$q_n(t)$ – поверхнева щільність теплового потоку, Вт/м²

Передбачається, що $\partial T/\partial x = \partial T/\partial y \approx 0$ (поділ тепла відбувається лише вглибину пластини) та $\delta = 2(a_0^2 \tau)^{0,5} \ll H$ (теплові впливи є поверхневими, а теплообмін на нижньому боці пластини не враховується).

Рівняння математичної моделі нагріву зразка (пластини великої товщини) мають вигляд:

$$C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad t > 0, \quad 0 < z < +\infty; \quad (3.39)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_n(t); \quad (3.40)$$

$$T|_{t=0} = T_0; \quad (3.41)$$

$$T \rightarrow T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad z \rightarrow +\infty. \quad (3.42)$$

Враховуючи $C_v(T)$ і $\lambda(T)$ та роблячи заміну

$$\theta(z, t) = T^{v+1} - T_0^{v+1} \quad (3.43)$$

отримуємо наступну систему рівнянь:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}; \quad (3.44)$$

$$\theta|_{t=0} = 0; \quad (3.45)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial z} \Big|_{z=0} = \bar{q}_n(t); \quad (3.46)$$

$$\theta \rightarrow 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad z \rightarrow +\infty, \quad \bar{q}_n(t) = \frac{v+1}{\lambda_0} q_n(t). \quad (3.47)$$

Для знаходження функції $\theta(z, t)$ на першому етапі розв'язання задачі використовуємо пряме косинус-перетворення Фур'є по координаті z :

$$\bar{\theta}(z, t) \rightarrow F_c(\omega, t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \bar{\theta}(u, t) \cos \omega u \, du. \quad (3.48)$$

Застосовуючи (3.48), перетворюємо систему рівнянь (3.44)-(3.47):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} \rightarrow \frac{dF_c}{dt}, \quad a_0^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \rightarrow a_0^2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty \frac{\partial^2 \theta}{\partial u^2} \cos \omega u \, du. \quad (3.49)$$

Інтегруючи (3.49) двічі по частинам, отримуємо

$$a_0^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \rightarrow -a_0^2 \omega^2 F_c + a_0^2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \bar{q}_n(t). \quad (3.50)$$

У результаті для знаходження функції $F_c(\omega, t)$ отримуємо наступне диференціальне рівняння:

$$\frac{dF_c}{dt} = -a_0^2 \omega^2 F_c + a_0^2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \bar{q}_n(t), \quad (3.51)$$

$$F_c|_{t=0} = 0. \quad (3.52)$$

Розв'язуючи диференціальне рівняння (3.51) з початковою умовою (3.52) одним з відомих методів (наприклад, методом Бернуллі [22]), отримуємо:

$$F_c(\omega, t) = a_0^2 \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^t \bar{q}_n(\tau) e^{-a_0^2 \omega^2 (t-\tau)} d\tau. \quad (3.53)$$

На другому етапі розв'язання задачі знаходимо оригінал $\theta(z, t)$, застосовуючи зворотне косинус-перетворення Фур'є для функції $F_c(\omega, t)$:

$$F_c(\omega, t) \rightarrow \theta(z, t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^\infty F_c(\omega, t) \cos \omega z d\omega. \quad (3.54)$$

Підставляючи (3.53) у (3.54), отримуємо

$$\theta(z, t) = \frac{2a_0^2}{\pi} \int_0^t q_n(\tau) d\tau \int_0^\infty e^{-a_0^2 \omega^2 (t-\tau)} \cos \omega z d\omega. \quad (3.55)$$

Використовуючи довідкові дані [23], отримуємо

$$\int_0^\infty e^{-a_0^2 \omega^2 (t-\tau)} \cos \omega z d\omega = \frac{\sqrt{\pi}}{2a_0 \sqrt{t-\tau}} e^{-\frac{z^2}{4a_0^2(t-\tau)}}. \quad (3.56)$$

Підставляючи (3.56) у (3.55) та враховуючи (3.39), а також $q_n(t) = q_{n0} = \text{const}$, знаходимо загальний розв'язок вихідної задачі:

$$T(z, t) = \left[T_0^{v+1} + \frac{(v+1)a_0 q_{n0}}{\sqrt{\pi} \lambda_0} \int_0^t \frac{e^{-\frac{z^2}{4a_0^2(t-\tau)}}}{\sqrt{t-\tau}} d\tau \right]^{\frac{1}{v+1}}. \quad (3.57)$$

3.2.2. Математична модель процесу нагрівання пластини малої товщини (консолі)

В процесі роботи АСМ (на етапах підведення-відведення зонду до

поверхні, сканування поверхні, та інше) на вільну (незакріплену) поверхню консолі діє концентрований потік енергії від лазерного випромінювання системи фотодетектування положення зонду. Тобто, на вільну поверхню консолі надходить рівномірно розподілений тепловий потік $q_n(t)$ (рис. 3.19):

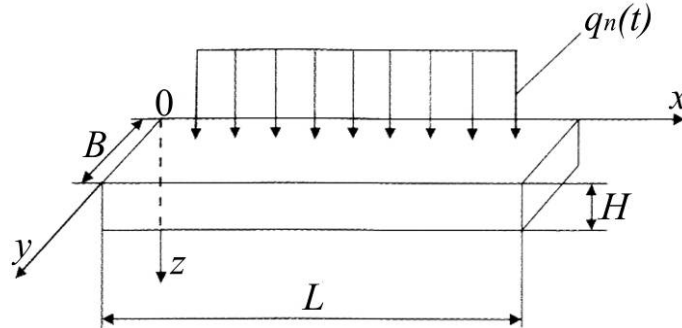


Рисунок 3.19 – Схема нагрівання вільної поверхні консолі: B , H , L – ширина, товщина й довжина консолі, м; $q_n(t)$ – поверхнева щільність теплового потоку), Вт/м²

$$q_n(t) \equiv q_{n0} = \frac{P_0}{B \cdot H},$$

де P_0 – потужність теплового потоку, Вт.

В якості моделі, розглядається пластина, для якої $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$ (розподіл тепла відбувається вглиб пластини), а також глибина зони термічного впливу $\delta = H$, тобто враховується теплообмін на нижньому боці пластини. При термічній дії на кремній лазерного випромінювання передбачається, що на нижньому боці пластини здійснюється радіаційний теплообмін з оточуючим середовищем.

Для знаходження значень $T(z, t)$ використовуються наступні нелінійні рівняння теплопровідності [24]:

$$C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad t > 0, \quad 0 < z < H \quad (3.58)$$

з початковою умовою

$$T|_{t=0} = T_0 \quad (3.59)$$

і граничними умовами

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_n(t) \quad (3.60)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = \varepsilon \bar{\sigma} (T_0^4 - T_c^4) \Big|_{z=H}, \quad (3.61)$$

де T_c – температура оточуючого середовища, К; $\lambda(T)$, $C_V(T)$ – коефіцієнт теплопровідності (Вт/(м·К)) і об'ємна теплоємність (Дж/(м³·К)) матеріалу пластини; ε – коефіцієнт чорноти випромінюючої поверхні; $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постійна Стефана-Больцмана. При цьому в рівняннях (3.58) – (3.61) враховуються емпіричні залежності $C_V(T) = C_{V0} T^\nu$, $\lambda(T) = \lambda_0 T_n$ [25].

Для розв'язання сформульованої нелінійної теплової задачі (3.58)–(3.61) робиться заміна змінних (для випадку $q_n(t) = q_{n0} = \text{const}$):

$$\theta = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\nu+1}, \quad \eta = \frac{z}{H}, \quad F_0 = \frac{a_0^2 t}{H}, \quad q_{n0} = \frac{H \cdot (\nu+1) \cdot q_{n0}}{\lambda_0 \cdot T_0^{\nu+1}}, \quad \theta_c = \frac{T_c}{T_0}, \quad (3.62)$$

$$\alpha = \frac{(\nu+1) H T_0^{3-\nu} \varepsilon \bar{\sigma}}{\lambda_0}$$

Тоді система рівнянь приймає безрозмірний вигляд:

$$\frac{\partial \theta}{\partial F_0} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2}, \quad F_0 > 0, \quad 0 < \eta < 1; \quad (3.63)$$

$$\theta|_{F_0=0} = 1; \quad (3.64)$$

$$-\frac{\partial \theta}{\partial \eta} \Big|_{\eta=0} = \bar{q}_{n0}; \quad (3.65)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \eta} \Big|_{\eta=1} = \alpha \left[\theta^{\frac{4}{\nu+1}}(1, F_0) - \theta_c^4 \right]. \quad (3.66)$$

Через нелінійність отриманої крайової задачі (3.63) – (3.66) для її розв'язання використовуємо інтегральний метод Гудмана [26]. Розподіл температури по товщині пластини приймається у вигляді полінома другого ступеня від θ :

$$\theta = \sum_{i=0}^2 \beta_i \eta^i, \quad (3.67)$$

де коефіцієнти β_i залежать у загальному випадку від F_0 .

Для виконання граничних умов (3.60) і (3.61) вираз для профілю температури береться у вигляді:

$$\theta = u - f(1 - \eta) + \frac{1}{2}(f + \bar{q}_{n0})(1 - \eta)^2, \quad (3.68)$$

де

$$f = \alpha \left(u^{\frac{4}{v+1}} - \theta_c^4 \right), \quad u = \theta(1, F_0). \quad (3.69)$$

Профіль температури $T(z, t)$ в цьому випадку описується виразом:

$$T(z, t) = \left\{ T^{v+1}(H, t) - \frac{(v+1)H\bar{\epsilon}\bar{\sigma}}{\lambda_0} [T^4(H, t) - T_c^4] \left(1 - \frac{z}{H} \right) + \frac{1}{2} \left(1 - \frac{z}{H} \right)^2 \times \right. \\ \left. \times \left[\frac{(v+1)H\bar{\epsilon}\bar{\sigma}}{\lambda_0} [T^4(H, t) - T_c^4] + \frac{(v+1)Hq_{n0}}{\lambda_0} \right] \right\}^{\frac{1}{v+1}}. \quad (3.70)$$

В отриманому виразі (3.70) залишається невизначеною температура нижньої сторони пластини $T(H, t)$. Для встановлення взаємозв'язку між часом нагрівання верхньої сторони консолі лазерним променем і температурою $T(H, t)$ проінтегруємо рівняння (3.63) по θ :

$$\int_0^1 \frac{\partial \theta}{\partial F_0} d\eta = \int_0^1 \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} d\eta \quad (3.71)$$

і обчислимо інтеграли в лівій і правій частинах отриманої рівності:

$$\frac{d}{dF_0} \left(\int_0^1 \theta d\eta \right) = \frac{\partial \theta(1, F_0)}{\partial \eta} - \frac{\partial \theta(0, F_0)}{\partial \eta}. \quad (3.72)$$

Визначаючи величини, що входять в (3.72), одержуємо звичайне диференціальне рівняння відносно $T(H, t)$:

$$\frac{d}{dt} \left[T^{v+1}(H, t) - \frac{(v+1)H\bar{\epsilon}\bar{\sigma}}{3\lambda_0} [T^4(H, t) - T_c^4] \right] = \\ = \frac{(v+1)a_0^2\bar{\epsilon}\bar{\sigma}}{\lambda_0 H} [T^4(H, t) - T_c^4] + \frac{(v+1)a_0^2 q_{n0}}{\lambda_0 H}. \quad (3.73)$$

з початковою умовою

$$T(H, t)|_{t=0} = T_0. \quad (3.74)$$

Для числових розрахунків, рівняння (3.73) переписується у вигляді:

$$\frac{dT(H, t)}{dt} = F[T(H, t)]; \quad (3.75)$$

$$F[T(H, t)] = \frac{3a_0^2}{H} \frac{\{\epsilon \bar{\sigma} [T^4(H, t) - T_c^4] + q_{n0}\}}{3\lambda_0 T^v(H, t) - 4H\epsilon \bar{\sigma} T^3(H, t)}; \quad (3.76)$$

$$q_{n0} = \frac{P_0}{BL}. \quad (3.77)$$

Таким чином, для визначення функції $T(H, t)$ отримуємо задачу Коші для звичайного диференціального рівняння 1-го порядку (3.74) – (3.77).

Отримані вирази (3.70), (3.74) – (3.77) дозволяють розраховувати вплив лазерного випромінювання на розподіли температури в консолі АСМ в процесі роботи пристрою, а також визначати допустимі діапазони зміни зазначених параметрів, що не призводять до руйнування матеріалу консолі.

Для більш простої та наближеної оцінки температурних полів в консолі можна знехтувати радіаційними тепловими витратами з її нижнього боку. Рівняння математичної моделі спрощуються та приймають вигляд:

$$C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right], \quad t > 0, \quad 0 < z < H; \quad (3.78)$$

$$T|_{t=0} = T_0; \quad (3.79)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = q_{n0}; \quad (3.80)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0. \quad (3.81)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (3.78) – (3.81) за допомогою методу перетворювання Фур'є [23] для функції $T(z, t)$, отримується наступний вираз:

$$T(z, t) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{(v+1)q_{n0}}{\lambda_0} \left[\frac{a_0^2 t}{H} + \frac{3z^2 - H^2}{6H} + \frac{2H}{\pi^2} \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{\cos \frac{\pi n z}{H}}{n^2} e^{-\left(\frac{\pi a_0 n}{H}\right)^2 t} \right] \right\}^{\frac{1}{v+1}}. \quad (3.82)$$

3.2.3. Математична модель процесу нагрівання поверхні напівсферичного елемента (вістря зонду)

У якості вістря зонду розглядається суцільний напівсферичний елемент радіусом R ($R = (8 - 10) \cdot 10^{-9}$ м) з кремнію, рис.3.20.

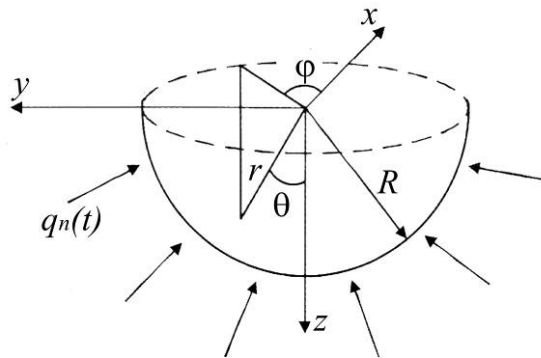


Рисунок 3.20 – Схема нагрівання напівсферичного елемента: R – радіус елемента, м; $q_n(t)$ – поверхнева щільність теплового впливу, Вт/м²; r, θ, φ – сферичні координати

Коефіцієнт температуропровідності для кремнію становить $a_0 = 8,8 \cdot 10^{-5}$ м²/с, а середній час тертя зонду об поверхню $\tau = 1,08$ нс [21]. Глибина проникнення теплової хвилі в зонд $\delta = 2(a_0^2 \tau)^{0,5} = 5,78 \cdot 10^{-9}$ м. Оскільки глибина проникнення теплової хвилі в зонд менше його радіусу ($R > \delta$), тоді його можна розглядати як симетричний напівсферичний елемент, зовнішня поверхня якого нагрівається тепловим потоком, що виникає внаслідок тертя цього елемента по поверхні зразка. В результаті утворюється сумарний рівномірно розподілений по поверхні тепловий потік

$\partial T/\partial \varphi = \partial T/\partial \theta = 0$. Конвективні та радіаційні теплові витрати не враховуються.

Рівняння математичної моделі розповсюдження тепла у напівсферичному елементі матимуть вигляд:

$$C_v(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \cdot \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right], \quad t > 0, \quad 0 < r < R; \quad (3.83)$$

$$T|_{t=0} = T_0; \quad (3.84)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = q_n(t); \quad (3.85)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad T|_{r=0} \neq \infty. \quad (3.86)$$

Використовуючи метод розділення змінних (метод Фур'є [21]) та враховуючи $q_n(t) \equiv q_{n0} = \text{const}$, а також скориставшись методикою розрахунку за формулами (3.43) – (3.56), отримується шуканий розв'язок задачі:

$$T(r, t) = \left\{ T_0^{v+1} + \frac{(v+1) q_{n0} R}{\lambda_0} \left[\frac{3a_0^2 t}{10R^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2R \sin\left(\mu_n \frac{r}{R}\right)}{\mu_n^3 \cos(\mu_n) R} \cdot e^{-\left(\frac{\mu_n a_0}{R}\right)^2 t} \right] \right\}. \quad (3.87)$$

$$\text{Тут, } \mu_n \text{ є коренем характеристичного рівняння: } J(\mu) = 0. \quad (3.88)$$

3.2.4. Математична модель процесу нагрівання торцевої поверхні циліндричного елемента (п'єзосканера)

Розглядається циліндричний елемент товщиною H ($H \gg R_1, R_2$) з п'єзоелектричної кераміки (рис. 3.21).

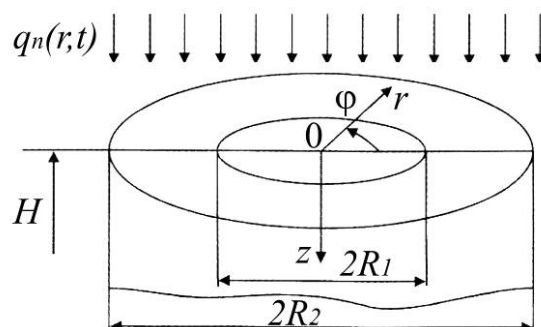


Рисунок 3.21 – Схема нагрівання циліндричного елемента

Пояснення до рис.3.21: R_1 , R_2 , H – відповідно, внутрішній та зовнішній радіуси торцевої поверхні та довжина елемента, м; $q_n(r, t)$ – поверхнева густина теплового впливу, Вт/м²; r , z , φ – циліндричні координати

Для такого елемента виконується умова $H \gg \delta = 2(a_0^2 \tau)^{0,5}$, тобто глибина проникнення теплової хвилі в елемент набагато менше його товщини. Тоді цей об'єкт можна розглядати як напівобмежений циліндричний елемент, торцева поверхня якого нагрівається тепловим потоком $q_n(r, t)$.

Такий потік виникає внаслідок внутрішнього тертя в п'єзокераміці в процесі його зворотно-оборотного руху при скануванні поверхні зразка за умови симетричного впливу теплового потоку $\partial T / \partial \varphi = 0$. Теплові потоки за рахунок конвекції та радіації не враховуються.

Рівняння математичної моделі розповсюдження тепла у розглядуваному елементі мають вигляд:

$$C_V(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right],$$

$$t > 0, \quad 0 < r < R_2, \quad 0 < z < +\infty; \quad (3.89)$$

$$T|_{t=0} = T_0; \quad (3.90)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_n(r, t); \quad (3.91)$$

$$T \rightarrow T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad z \rightarrow +\infty. \quad (3.92)$$

В якості функції розподілу теплового впливу, розглянемо наступну:

$$q_n(r, t) = \begin{cases} q_{1n}, & 0 < r < R_1 \\ q_{2n}, & R_1 < r < R_2, \\ 0, & R_2 < r < +\infty \end{cases} \quad (3.93)$$

де $q_{1n} = \frac{p_0}{\pi R_1^2}$; $q_{2n} = \frac{p_0}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}$; p_0 – потужність теплового впливу, Вт.

З врахуванням $C_V(T)$ та $\lambda(T)$, $p_0 = \text{const}$, отримується:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a_0^2 \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right); \quad (3.94)$$

$$\theta|_{t=0} = 0; \quad (3.95)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|_{z=0} = \bar{q}_n; \quad (3.96)$$

$$\theta \rightarrow 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial z} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad z \rightarrow +\infty; \quad (3.97)$$

$$\text{де} \quad \theta = T^{v+1} - T_0^{v+1}, \quad a_0^2 = \lambda_0 / C_{V0}; \quad (3.98)$$

$$\bar{q}_n = \begin{cases} \frac{q_{1n}(v+1)}{\lambda_0}, & 0 < r < R_1 \\ \frac{q_{2n}(v+1)}{\lambda_0}, & R_1 < r < R_2 \\ 0, & R_2 < r < +\infty \end{cases} \quad (3.99)$$

Використовуючи перетворення Ханкеля [21], отримується наступний розв'язок задачі (3.94)-(3.97):

$$\begin{aligned} \theta(r, z, t) = & \frac{1}{2\lambda_0} \frac{d}{dt} \int_0^t \int_0^\infty I_0(r\tau) \times \\ & \times \left[\int_0^{R_1} x I_0(x\tau) \frac{F_{1n}(v+1)}{\lambda_0} dx + \int_0^{R_1} x I_0(x\tau) \frac{F_{2n}(v+1)}{\lambda_0} dx \right] \times \\ & \times \left[e^{-z\tau} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2a_0\xi^{1/2}} - \tau a_0 \xi^{1/2} \right) \right) - e^{z\tau} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2a_0\xi^{1/2}} + \tau a_0 \xi^{1/2} \right) \right) \right] d\tau d\xi. \end{aligned} \quad (3.100)$$

Для випадку рівномірної дії тепла на торцеві поверхні циліндричного елемента ($R_1 = R_2 = R_0$, $q_{1n} = q_{2n} = p_0(v+1)/\pi R_0^2$) отримується наступний розв'язок вихідної задачі:

$$\begin{aligned} \theta(r, z, t) = & \left\{ T_0^{v+1} + \frac{p_0(v+1)}{\pi R_0^2} \int_0^{+\infty} \left(1 - \frac{r^2 \xi^2}{4} + \frac{r^4 \xi^4}{64} - \frac{r^6 \xi^6}{2304} \right) \times \right. \\ & \times \left. \left(1 - \frac{\xi^2 R_0^2}{8} + \frac{\xi^4 R_0^4}{192} - \frac{\xi^6 R_0^6}{9216} \right) \times \left[e^{-z\tau} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2a_0 t^{1/2}} - a_0 \xi t^{1/2} \right) \right) \right] d\xi \right\}^{\frac{1}{v+1}}. \end{aligned} \quad (3.101)$$

У випадку нерівномірної дії тепла на торцеві поверхні елемента:

$$q_{1n} = \frac{p_{01}(v+1)}{\pi R_1^2}, \quad q_{2n} = \frac{p_{02}(v+1)}{\pi(R_2^2 - R_1^2)},$$

де p_{01} , p_{02} – потужності джерел теплового впливу, що рівномірно розподілені на окремих ділянках поверхні елемента) отримуємо наступний розв'язок:

$$\begin{aligned} T(r, z, t) = & \left\{ T_0^{v+1} + \frac{v+1}{4\pi\lambda_0} \int_0^\infty \left(1 - \frac{r^2\xi^2}{4} + \frac{r^4\xi^4}{64} - \frac{r^6\xi^6}{2304} \right) \times \right. \\ & \times \left[p_{01} \left(1 - \frac{\xi^2 R_1^2}{8} + \frac{\xi^4 R_1^4}{192} - \frac{\xi^6 R_1^6}{9216} \right) + \right. \\ & \left. \left. + p_{02} \left(1 - \frac{\xi^2 (R_2^2 - R_1^2)}{8} + \frac{\xi^4 (R_2^2 - R_1^2)}{192} - \frac{\xi^6 (R_2^2 - R_1^2)}{9216} \right) \right] \times \right. \\ & \left. \times \left[e^{-z\tau} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2a_0 t^{1/2}} - a_0 \xi t^{1/2} \right) \right) - e^{z\tau} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2a_0 t^{1/2}} + a_0 \xi t^{1/2} \right) \right) \right] d\xi \right\}^{\frac{1}{v+1}}. \end{aligned} \quad (3.102)$$

3.2.5. Чисельне розв'язання математичних моделей процесу нагрівання у блоці контролю атомно-силового мікроскопу

Для чисельного розв'язання математичних моделей процесу нагрівання елементів блоку контролю АСМ використовувався метод скінчених елементів, коли область розв'язків задачі розбивається на $m \times n$ скінчених елементів трикутної форми – $e_1, e_2, \dots, e_{m \times n}$ з подальшою нумерацією їх вузлів [27].

При цьому загальний функціонал F представляється у вигляді суми функціоналів $F^{(e)}$ окремих скінчених елементів: $F = F^{(1)} + F^{(2)} + \dots + F^{(m \times n)}$, де функціонал будь-якого e -го елемента можна записати таким чином:

$$F^{(e)} = \frac{1}{2} \int_S \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right]^{(e)} dS. \quad (3.103)$$

Далі, функція температури $T^{(e)}$ в межах кожного скінченого елемента апроксимується поліномом відносно вузлових температур:

$$T^{(e)} = N_i^{(e)}T_i + N_j^{(e)}T_j + N_k^{(e)}T_k, \quad (3.104)$$

де $N_i^{(e)}, N_j^{(e)}, N_k^{(e)}$ – функції форми для скінченного елемента площею S ; T_i, T_j, T_k – значення температур в вузлових точках скінченного елемента.

Після диференціювання поліном (3.104) з урахуванням функції форми та врахувавши, що підінтегральний вираз рівняння (3.103) не залежить від координат x та y , а елемент площі визначається, як $dS = \int_S dx dy$. Тоді,

функціонал (3.103) перепишеться у наступному вигляді:

$$F^{(e)} = \frac{1}{8S} \left[\left(\Delta x_i T_i + \Delta x_j T_j + \Delta x_k T_k \right)^2 + \left(\Delta y_i T_i + \Delta y_j T_j + \Delta y_k T_k \right)^2 \right]^{(e)}, \quad (3.105)$$

де S – площа e -го скінченного елемента; T_i, T_j, T_k – значення температур у вузлових точках скінченного елемента; $\Delta x, \Delta y$ – різниця координат x та y двох сусідніх точок скінченного елемента.

Необхідні умови мінімуму загального функціоналу будуть виконані, якщо:

$$\frac{\partial F}{\partial T_p} = \sum_{e=1}^{m \times n} \frac{\partial F^{(e)}}{\partial T_p} = 0 \quad (p = 1, 2, \dots, m \times n). \quad (3.106)$$

Ці умови в розгорнутому вигляді є системою рівнянь відносно вузлових температур $T_1, T_2, \dots, T_{m \times n}$ об'єкту, розв'язання якої дозволяє отримати матрицю значень температури в вузлах скінчено-елементного об'єкту.

Розв'язок математичних моделей енергетичного впливу у блоці контролю АСМ, а також дослідження розподілу теплових полів реалізується за допомогою програмного модулю написаного автором на об'єктно-орієнтованій мові C++.

Програмний модуль дозволяє отримати і дослідити розподіл теплового поля по поверхні та в об'ємі об'єктів із заданими теплофізичними властивостями.

Для розрахунків використовувалися відомі значення геометричних параметрів та теплофізичних характеристик матеріалів, з яких виготовляються, як елементи блоку контролю, так і об'єкти дослідження і які

входять до виразів (3.57), (3.82), (3.87), (3.102). Застосовуючи розроблену автором програму розрахунку теплових витрат та енергетичних впливів в елементах блоку контролю, встановлено, що найбільший тепловий внесок здійснює енергія, що подається на п'єзосканер, тоді як найбільше тепловиділення відбувається в зоні контакту зонда з поверхнею, рис. 3.22.

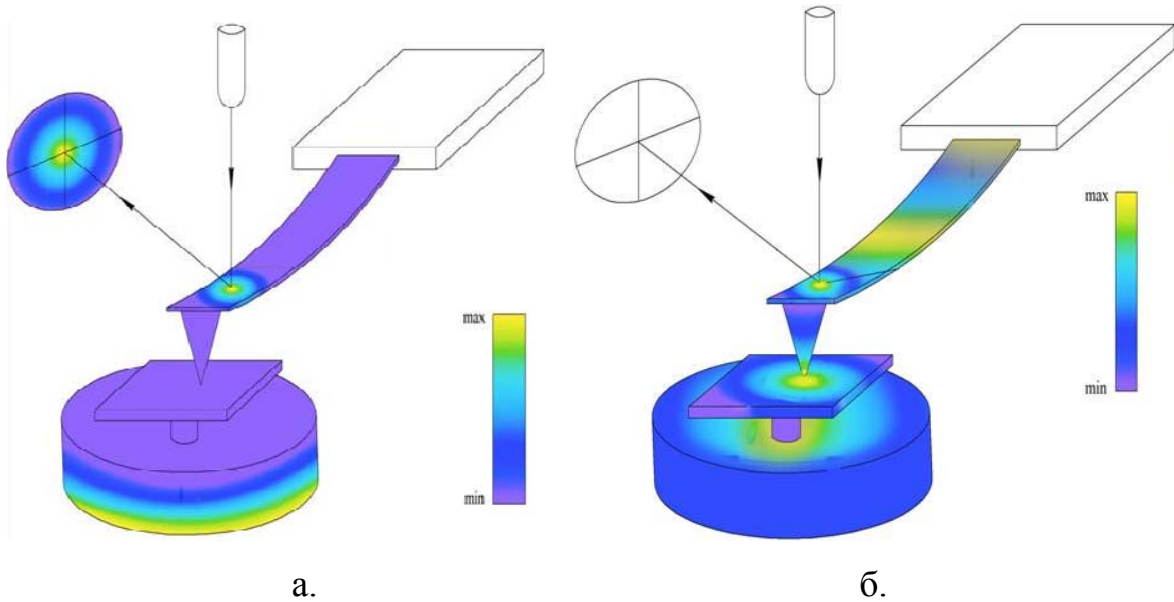


Рисунок 3.22 – Розподіл теплових внесків (а) та тепловиділення (б) в елементах блоку контролю АСМ (за результатами аналітичних розрахунків)

3.2.6. Оцінка математичних моделей методом еквівалентних теплових схем

Узгодження математичних моделей теплообміну проводилося за схемою теплового балансу, в якому спільний тепловий внесок рівномірно розподілявся між усіма елементами, що приймали участь у теплообміні. При цьому не враховувалися теплофізичні властивості матеріалів, з яких виготовлялися ці елементи.

Для оцінки адекватності розглянутих моделей теплообміну була складена та досліджена еквівалентна теплова схема АСМ (рис. 3.23), яка ґрунтується на використанні теплових опорів, що з'єднуються в теплову мережу. Така мережа імітує реальні шляхи передачі теплових потоків у блоці

контролю АСМ, і передбачає аналогію теплового потоку з електричним струмом. Діоди між блоками на еквівалентній тепловій схемі мають інформаційний характер і визначають переважний напрямок передачі теплоти між різними функціональними блоками еквівалентної схеми.

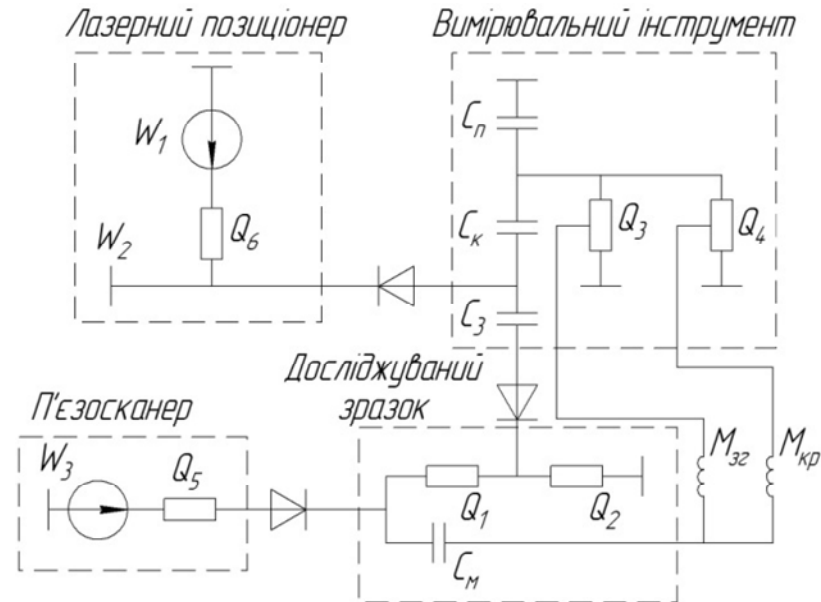


Рисунок 3.23 – Еквівалентна теплова схема блоку контролю АСМ:

Теплові витрати: Q_1 – при механічному терті зонду по досліджуваній поверхні; Q_2 – при дії електромагнітних полів та електричного заряду; Q_3 – при вигині консолі; Q_4 – при крученні консолі; Q_5 – при крученні п'єзосканеру; Q_6 – при дії лазерного випромінювання на консоль; W_1 – енергія випромінювання лазерного позиціонера; W_2 – енергія лазерного випромінювання, що потрапляє на фотодетектор; W_3 – енергія, що подається на п'єзосканер; C_n , C_k , C_z , C_m – питома теплоємність матеріалу п'єзочипу, консолі, зонду та зразку відповідно; M_{32} , M_{kr} – дисипація енергії, що відбувається від дії механічних моментів вигину та кручення консолі

Вихідна система рівнянь до схеми, наведеної на рис.3.23, що працює в усталеному режимі:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = \left(\sum_{k=1}^m \Lambda_{k1} \right) \cdot (\theta_1 - \theta_\epsilon) - \sum_{k=1}^m (\Lambda_{k1} \cdot (\theta_k - \theta_\epsilon)) \\ P_2 = \left(\sum_{k=1}^m \Lambda_{k2} \right) \cdot (\theta_2 - \theta_\epsilon) - \sum_{k=1}^m (\Lambda_{k2} \cdot (\theta_k - \theta_\epsilon)) \\ \dots\dots\dots \\ P_m = \left(\sum_{k=1}^m \Lambda_{km} \right) \cdot (\theta_m - \theta_\epsilon) - \sum_{k=1}^m (\Lambda_{km} \cdot (\theta_k - \theta_\epsilon)) \end{array} \right. \quad (3.107)$$

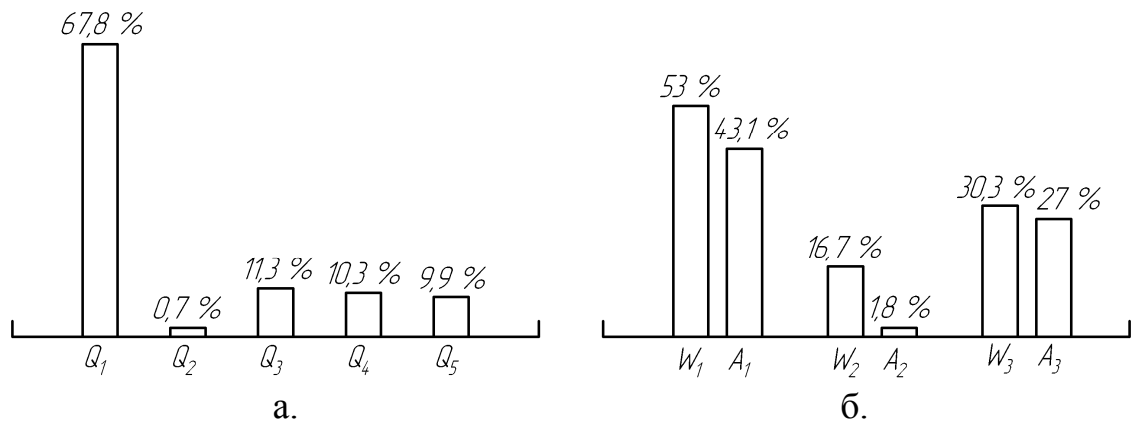


Рисунок 3.24 – Діаграми тепловиділення (а) та енергетичного теплового внеску (б) в зоні контакту зонда з досліджуваної поверхнею. Тепловиділення:

Q_1 – при механічному терті зонду по досліджуваній поверхні; Q_2 – при дії електромагнітних полів і електричного заряду; Q_3, Q_4 – при вигині та крученні консолі; Q_5 – при крученні п'єзосканера; W_1 – енергія, яка задіює п'єзосканер; A_1, A_2 – корисна робота п'єзосканеру та зонду АСМ; W_2 – енергія, що подається на консоль із зондом; W_3 – енергія випромінювання лазерного позиціонера; A_3 – енергія лазерного випромінювання, що потрапляє на фотодетектор.

Таким чином, використання методу еквівалентних теплових схем для оцінки математичних моделей енергетичної взаємодії зондів АСМ з поверхнями матеріалів, а також подальшого дослідження розподілу теплових полів в блоці контролю АСМ відрізняється від інших чисельних та аналітичних методів достатньою точністю та швидкістю розрахунків. На сьогоднішній день, через відсутність експериментальних методів підтвердження адекватності математичних моделей теплопровідності в зоні взаємодії зонду з досліджуваною поверхнею, даний метод є альтернативним для підтвердження результатів, отриманих в процесі моделювання. При цьому, розбіжність між результатами математичного моделювання та результатами, отриманими за еквівалентною тепловою схемою не перевищує 5-8%.

3.3. Визначення режимів стабільної роботи атомно-силового мікроскопу при контролі пристроїв мікросистемної техніки

Для уточнення діапазону параметрів стабільної роботи блоку контролю АСМ при дослідженні пристроїв МСТ з урахуванням мінімізації лімітуючих факторів силової та енергетичної взаємодії зонду АСМ з досліджуваною поверхнею (капілярних сил, сил електростатичної взаємодії, дисипації тепла в зоні фізичного контакту зонду з поверхнею) за яких досягаються найвищі показники точності, надійності та швидкодії визначення топології та фізико-механічних характеристик таких пристроїв, було використано методу планування багатofакторного експерименту [28].

В даному методі, за відгук було обрано відносну похибку проведення експерименту ε за умови, що вона прагне до нуля. Незалежними змінними (факторами) були обрані: X_1 – швидкість сканування (V), X_2 – час механічної релаксації (τ), X_3 – крок сканування (h) (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Експериментальні рівні варіювання

Фактори оптимізації	Кодоване значення факторів	Інтервал варіювання	Рівні факторів		
			верхній	основний	нижній
Швидкість сканування, V , нм/с	X_1	13,5	45	31,5	18
Час релаксації, τ , мс	X_2	1,05	6,6	5,55	4,5
Крок сканування, h , нм	X_3	3,5	85	81,5	78

При цьому враховувалися фізична незалежність вхідних та вихідних параметрів, нормальність розподілу випадкових результатів, стійкість експерименту до перешкод, а порядок виконання досліджень не порушував ортогональність плану.

Таким чином, було складено план трьохфакторного експерименту [29]. Далі, використовуючи методи статистичного планування n -го порядку, математична модель була отримана у вигляді нелінійного рівняння регресії квадратичної форми для трьох факторів оптимізації:

$$C_m = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2, \quad (3.109)$$

де x – безрозмірна змінна ($x_i = \frac{X_i - X_i^{(0)}}{\Delta X_i}$).

Для виключення систематичної похибки досліди рандомізовано за допомогою таблиці випадкових чисел. На основному рівні проведено три паралельних експерименти, на основі яких встановлено дисперсію досліду при двох ступенях свободи $s_c^2 = 0,0139$.

За даними експерименту та з використанням методу планування багатофакторного експерименту розраховано коефіцієнти регресії (у кодованому масштабі):

$$\begin{aligned} b_0 &= 0,053 & b_{11} &= -0,108 & b_{22} &= -0,009 & b_{33} &= 0,025 \\ b_1 &= 0 & b_{12} &= 0,057 & b_{23} &= 0,001 \\ b_2 &= -0,059 & b_{13} &= 0 \\ b_3 &= 1,061 \end{aligned}$$

Табличне значення t -критерію Стьюдента при 9 дослідках та рівні значимості 0,05 складає 2,26. Довірчі інтервали при розрахунку коефіцієнтів регресії, відповідно: $b_0 - 0,29$; $b_i - 0,18$; $b_{ii} - 0,24$; $b_{ij} - 0,19$.

Отримана модель залежності відносної похибки проведення контролю від трьох визначених факторів має вигляд:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 0,053 - 0,059 \cdot \tau + 1,061 \cdot h + 0,057 \cdot V \cdot \tau + 0,001 \cdot \tau \cdot h - \\ &- 0,108 \cdot V_{cop}^2 - 0,009 \cdot \tau^2 + 0,025 \cdot h^2. \end{aligned} \quad (3.110)$$

В результаті дослідження вищенаведеного рівняння регресії були встановлені залежності відносної похибки від швидкості сканування V та часу релаксації τ за різних значень кроку сканування h (рис.3.25).

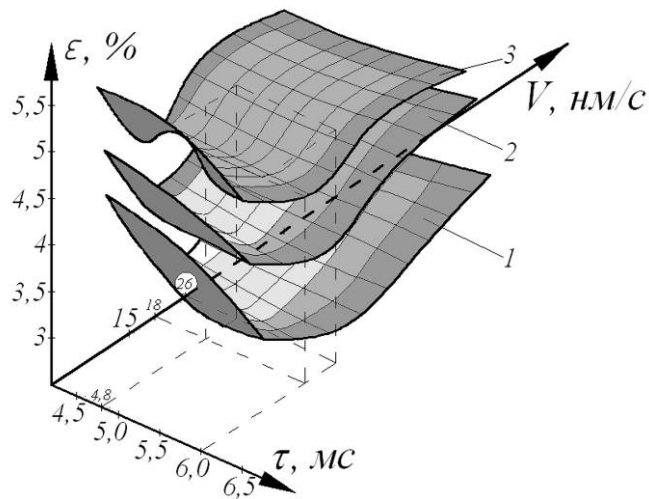


Рисунок 3.25 – Залежність відносної похибки визначення від швидкості сканування V та часу релаксації τ за різних значень кроку сканування h :

1 – $h = 78$ нм; 2 – $h = 82$ нм; 3 – $h = 85$ нм.

Як можна побачити із цих залежностей, із зменшенням швидкості сканування до 26 нм/с, кроку сканування до 82 нм та часу релаксації до $6 \cdot 10^{-3}$ с, відносна похибка досягає мінімальних значень $\varepsilon \leq 5\%$. В той же час, збільшення нижнього значення для часу релаксації з $4,5 \cdot 10^{-3}$ с до $4,8 \cdot 10^{-3}$ с, веде до додаткового зменшення відносної похибки до 3,5%.

Таким чином, на основі проведеного експериментально-статистичного дослідження методом планування багатofакторного експерименту та аналізуючи отримані залежності (рис.3.25), уточнено раціональні діапазони параметрів стабільної роботи блоку контролю АСМ при дослідженні пристроїв МСТ з урахуванням мінімізації лімітуючих чинників силової та енергетичної взаємодії зонду АСМ з досліджуваною поверхнею за яких відносна похибка має найменше значення.

3.4. Висновки до розділу

Таким чином, в результаті теоретичних досліджень фізичних процесів та явищ, що відбуваються при роботі блоку контролю АСМ в процесі його роботи; використання розробленого вимірювального стенду; складання та

дослідження еквівалентної теплової схеми, уточнено механізми силової та енергетичної взаємодії зондів АСМ з досліджуваними матеріалами. На їх основі розроблені математичні моделі, що дозволяють визначати режими стабільної роботи АСМ при контролі характеристик компонентів МСТ.

Проведене математичне моделювання процесів силової та енергетичної взаємодії зондів АСМ з поверхнями матеріалів на підготовчій, завершальній стадіях та стадії сканування досліджуваної поверхні. При цьому враховувалися силові та енергетичні складові процесів, що відбуваються у блоці контролю АСМ. Шляхом мінімізації чинників (сили електростатичної $F_{ес}$, капілярної $F_{к}$, пружної $F_{пр}$ взаємодії та тепловиділення в результаті тертя зонда об поверхню Q_1), що негативно впливають, як на результати контролю, так і на стан зонду та поверхні визначені режими стабільної роботи АСМ.

Мінімізація лімітуючих факторів шляхом застосування оригінальних технічних рішень, дозволила більш точно (відносна похибка зменшується на 2 – 3,5%, а коефіцієнт варіації – на 2 – 2,4%) встановити діапазон робочих параметрів сканування, що забезпечують стабільну роботу АСМ в процесі контролю: час механічної релаксації $(4,8 – 6) \cdot 10^{-3}$ с; швидкість $(18 – 26)$ нм/с та крок сканування $(78 – 82)$ нм.

Список використаних джерел:

1. М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, и С. А. Шелестовская, “Исследование влияния состояния поверхности кремниевых зондов для атомно-силовой микроскопии на точность и качество получаемых топограмм”, *Электроника и связь. Тем. выпуск: Электроника и нанотехнологии*, №2 (61), с. 14-17, 2011.
2. C. Ye et al., “Microstructure and mechanical properties of copper subjected to cryogenic laser shock peening”, *Journal of Applied Physics*, 2011.

3. М. А. Бондаренко и др., “Изучение механизма образования переходной зоны в поверхностном слое пьезокерамических изделий нанотехники”, *Наноинженерия*, №6, с. 25-29, 2011.
4. М. А. Бондаренко и др., “Изучение механизма формирования ультратонких функциональных покрытий на оптическом стекле при комбинированной электронно-лучевой микрообработке”, на *III междунар. науч. конф. Современные проблемы физики конденсированного состояния, нанотехнологий и наноматериалов*, Алматы, Казахстан: Казах университеті, 2014, с.64-65.
5. М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, С. А. Билоконь, и В. А. Андриенко, “Энергетический теплообмен в зоне контакта зонда атомно-силового микроскопа с исследуемой поверхностью”, на *XII Междунар. конф. Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии*, Минск, Белларусь: Беларуская навука, 2016, с. 235-241.
6. Understanding Nano, Nanotechnology Applications, 2016. [Online] Available: <http://www.understandingnano.com/nanotechapplications.html>. Accessed on: May 23, 2016.
7. В. С. Антонюк и др., “Повышение точности и надежности исследования поверхностей пьезоэлектрических керамик методом атомно-силовой микроскопии”, на *12-ая междунар. научно-практ. конф. Качество, стандартизация, контроль: теория и практика*, Киев, Украина, 2012, с. 13-17.
8. D. Sarid, *Scanning force microscopy with applications to electric, magnetic and atomic forces*. New York, NY, USA: Oxford Univ. Press, 1991.
9. О. К. Гаришин, “Моделирование взаимодействия зонда атомно-силового микроскопа с полимерной поверхностью с учетом сил Ван-дер-Ваальса и поверхностного натяжения”, *Наносистемы: физика, химия, математика*, №3 (2), с. 47-54, 2013.
10. С. А. Билоконь, И. А. Рева, М. А. Бондаренко, и И. В. Яценко, “Гидрофильное взаимодействие зонда атомно-силового микроскопа с диэлектрической поверхностью”, *II Всеукр. наук.-практ. конф. мол. вчен. та студ. Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення та перспективи*, Луцьк, Україна, 2012, с. 33-35.

11. С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко, и В. С. Антонюк, “Влияние сил адгезии между исследуемой поверхностью и зондом для атомно-силовой микроскопии”, *Наноинженерия*, №6 (12), с. 41-45, 2012.
12. С. А. Билоконь и др., “Минимизация влияния капиллярных сил при исследовании поверхностей изделий наноэлектроники в контактном режиме атомно-силового микроскопа”, на *XI Междунар. конф. Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии*, Минск, Белларусь: Беларуская навука, 2014, с.164-168.
13. С. А. Билоконь, И. А. Рева, и О. В. Свиридова, “Повышение точности и срока эксплуатации зондов для атомно-силовой микроскопии”, на *5-та міжнар. наук.-техн. конф. Сенсорна електроніка та мікросистемні технології*, Одеса, 2012, с. 112.
14. Группа компаний НТ-МДТ: Основы СЗМ. 2016. [Online] Available: <http://www.ntmdt.ru/spm-basics/view/sfm> (14.01.14). Accessed on: May 23, 2016.
15. М. О. Бондаренко, С. О. Білокінь, В. С. Антонюк, та Ю. Ю. Бондаренко, “Механізм виникнення та нейтралізація залишкової трибоелектрики при скануванні кремнієвим зондом атомно-силового мікроскопу діелектричних поверхонь”, *Журнал нано- та електронної фізики*, Т. 6, № 2, с. 02018-1-02018-5, 2014.
16. М. И. Горлов, “Статическое электричество и полупроводниковая электроника”, *Природа*, № 12, 2006.
17. Пат. 91425 Україна, МПК⁶ H05F 3/06. Спосіб видалення залишкового трибоелектричного заряду / С.О.Білокінь, В.С.Антонюк, М.О.Бондаренко, Ю.Ю.Бондаренко (Україна); власники С.О.Білокінь та ін. – № u201312656; заявл. 03.02.2014; опублік. 10.07.2014; Бюл.№13. – 6 с.
18. Н. Г. Циркунова и др., “Влияние зонда на топографические изображения в атомно-силовой микроскопии”, *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 9, с. 82-85, 2009.
19. С. А. Билоконь, И. А. Рева, М. А. Бондаренко, и М. П. Рудь, “Математическое моделирование процесса деформации измерительной системы атомно-силового микроскопа и расчет допустимых режимов ее

- работы”, на *X Междунар. конф. Методол. аспекты сканирующей зондовой микроскопии*, Минск, Беларусь: Беларуская навука, 2012, с. 297-301.
20. В. Н. Тимофеев, А. И. Погалов, С. В. Угольников, А. М. Андрианов, и О. В. Панкратов, *Техническая механика микросистем*, Москва, Россия: МИЭТ, 2006.
 21. В. А. Ващенко та ін., *Основи теплоперенесення в елементах оптичного приладобудування*. Київ, Україна: НТУУ “КПІ”, 2012.
 22. Н. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, и М. М. Смирнов, *Дифференциальные уравнения математической физики*. Москва, Россия: Физматгиз, 1972.
 23. В. С. Зарубин, *Инженерные методы решения задач теплопроводности*. Москва, Россия: Энергоатомиздат, 1983.
 24. Л. В. Лыков, *Теория теплопроводности*. Москва, Россия: Высшая школа, 1967.
 25. В. А. Ващенко, *Высокотемпературные технологические процессы взаимодействия концентрированных источников энергии с материалами*. Черкассы, Україна: Черкасский инженерно-технологический инс-т, 1996.
 26. Л. Л. Коздоба, *Решения нелинейных задач теплопроводности*. Київ, Україна: Наукова думка, 1976.
 27. О. Зенкевич, *Метод конечных элементов в технике*. Москва, РФ: Мир, 1975.
 28. А. Е. Кононюк, *Основы научных исследований (общая теория эксперимента)*. Київ, Україна, 2011.
 29. М. А. Bondarenko, J. J. Bondarenko, and S. A. Shelestovskaya, “Research of Influence of the State of Surface of Probes for AFM on Exactness and Quality of the Topograms”, in *XXXI International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology*, Kyiv, 2011, pp. 60.

РОЗДІЛ 4.

ВПЛИВ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ФАКТОРІВ НА ЯКІСТЬ ПРОЦЕСУ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТІВ МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ МЕТОДОМ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ

В розділі, проводиться експериментально-статистичне моделювання для оцінювання впливу кліматичних факторів та робочих параметрів АСМ при застосуванні та довготривалому зберіганні зонду на процес неруйнівного контролю. Також встановлюються діапазони характеристик, в межах яких підвищується точність, чутливість та відтворюваність результатів контролю при визначенні характеристик компонентів МСТ.

Враховано, що найбільший дестабілізуючий вплив на експлуатаційні характеристики зондів АСМ чинять: кліматичні фактори (при тривалому зберіганні зонду в умовах оточуючого середовища), а саме: температура, відносна вологість, концентрація аміаку та з'єднань сірки в оточуючій атмосфері; робочі параметри процесу контролю (час механічної релаксації, швидкість та крок сканування), за яких гарантується надійний та стабільний результат експериментальних досліджень.

Дотримання діапазонів впливу дестабілізуючих факторів при контролі компонентів МСТ дозволяє проводити уточнення приведенного часу експлуатації та довготривалого зберігання зонду.

4.1. Визначення закономірностей впливу кліматичних факторів оточуючого середовища на метрологічні характеристики методу атомно-силової мікроскопії

В якості експериментальних тестових зразків при визначенні впливу кліматичних факторів оточуючого середовища та параметрів сканування на характеристики поверхні компонентів МСТ обиралися плоскопаралельні

прямокутні ($25 \times 25 \times 0,5$ мм) пластини з монокристалічного (n-Si(111)) кремнію у кількості 30 шт. Використання тестових зразків з n-Si(111) обумовлене необхідністю проведення дослідницького експерименту за умов максимальної тотожності за хімічним складом та структурною будовою матеріалів зонду та досліджуваної поверхні. Це дозволяє мінімізувати вплив дії пружних та капілярних сил, дію електростатичного розряду, уникнути ефекту “залипання” зонду на поверхні, тощо, чим максимально підвищити точність та адекватність отримуваних результатів. Крім того, використання монокристалічного кремнію з атомарно гладкою поверхнею в якості зразка, зменшує появу поверхневих артефактів АСМ-зображення [1].

Усі тестові зразки поділялися на три партії однакової кількості. Перша партія зразків застосовувалася для визначення впливу кліматичних факторів оточуючого середовища при незмінних значеннях параметрів сканування, що відповідає стандартним налаштуванням робочих параметрів блоку контролю АСМ (кроку сканування $h = 100$ нм, швидкості $V = 100$ нм/с, часу механічної релаксації $\tau = 9$ мс). Друга партія – для визначення впливу робочих параметрів при незмінних значеннях кліматичних факторів (температури $T = 295$ К, відносної вологості $\phi = 70\%$, слідів з'єднань аміаку та сірки не виявлено). Третя партія (контрольна) – застосовувалася для визначення впливу кліматичних факторів та робочих параметрів сканування виходячи із діапазону значень цих параметрів, встановлених при експериментальному випробуванні зразків з першої та другої партій і за яких отримується надійний та стабільний результат досліджень (відносна похибка $\varepsilon \leq 5\%$, ймовірність безвідмовної роботи блоку контролю $P_A \geq 0,95$).

Перед проведенням експерименту усі вихідні зразки підлягали сушці в лабораторній сушильній шафі “ШС-0,25-45” протягом 150 хв за температури 125 °С. Протягом цього часу за даної температури зі зразків повністю видалялися залишки вологи та органічних сполук.

Подальше визначення мікрорельєфу поверхні зразків проводилося в статистичному режимі на ділянках поверхні (максимально 13×13 мкм) згідно

розроблених в роботі [2] методик та рекомендацій. При цьому регулювання температури проводилося за допомогою терморегулятора “Huber”, а вологості – приладу “S4000”.

За результатами експерименту для визначення закономірностей впливу кліматичних умов оточуючого середовища на метрологічні характеристики методу АСМ та з метою отримання найбільш прийнятних діапазонів параметрів цих характеристик проведено статистичний аналіз та побудовано регресійну модель залежності метрологічних характеристик в умовах оточуючого кліматичного впливу, а саме: Y_1 – відносної похибки (ϵ , %); Y_2 – зменшення чутливості блоку контролю (δS , %); Y_3 – відтворюваність результатів експерименту ($Conv$, %). Для оцінки адекватного впливу кліматичних факторів була проведена серія експериментів. В результаті визначені найбільш значимі фактори та рівні їх варіювання, які прийняті після формалізації (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Фактори та рівні варіювання при визначенні закономірностей впливу кліматичних факторів оточуючого середовища на метрологічні характеристики методу АСМ

Фактор	Назва фактору	Умовне позначення одиниці вимірювання	Міні- мальне значення	Макси- мальне значення	Крок зміни
X_1	Температура	T , К	291	299	1
X_2	Відносна вологість	ϕ , %	30	70	5
X_3	Концентрація аміаку	C_{NH_3} , мг/м ³	0	0,036	0,0045
X_4	Концентрація з'єднань сірки	C_S , мг/м ³	0	0,005	0,0006

Для побудови регресійних моделей при встановлених вимогах (кількість факторів і рівнів варіювання) використовувалися робастні плани

експерименту на основі послідовностей псевдовипадкових чисел [3], використання яких має переваги перед іншими типами планів, а саме:

- довільну кількість рівнів варіювання (може дорівнювати кількості дослідів);
- можливість побудови плану зі збереженням усіх попередніх дослідів; план одночасно є планом для пошуку оптимуму.

Вказані переваги дають можливість при відносно невеликій кількості дослідів підвищити їх надійність. Робоча матриця експерименту та його результати наведені в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Робоча матриця експерименту та результати експериментальних досліджень

№ експерименту	X_1	X_2	X_3	X_4	Y_1	Y_2	Y_3
1	291	30	0	0	5,0	16,2	2,0
2	292	35	0,0045	0,0006	1,8	9,4	2,5
3	293	40	0,0090	0,00125	0,1	4,9	3,1
4	294	45	0,0135	0,00185	0,1	2,3	3,4
5	295	50	0,018	0,0025	1,5	0,9	3,8
6	296	55	0,0225	0,00365	4,5	1,9	4,3
7	207	60	0,027	0,00375	8,7	4,4	4,8
8	298	65	0,0315	0,00435	14,9	8,6	5,1
9	299	70	0,036	0,005	23,4	15,2	5,6

Як видно з табл.4.2, найкращі результати показали наступні зразки:

- зразки 3 та 4 – найменша похибка;
- зразок 5 – найменше зменшення чутливості блоку контролю;
- зразок 1 – найбільша відтворюваність результатів (найменше значення коефіцієнту варіації).

Моделі отримувалися за допомогою спеціалізованого програмного засобу PRIAM (планування, регресія та аналіз моделей) [3], [4]. При пошуку структури регресійної моделі аналізувалися степені факторів до другого включно, а також подвійні взаємодії. Для підвищення ймовірності правильного визначення структури і поліпшення обчислювальної стійкості, попередньо виконувалося перетворення з використанням поліномів Чебишева і нормування [4] – [6].

Після обробки результатів експериментальних досліджень побудовано математичні регресійні моделі, які описують залежності критеріїв оптимізації від зовнішніх кліматичних факторів [7]:

– для визначення відносної похибки:

$$Y_1 = 3,271 - x_1 + x_2 - x_3 + x_4 + 19,951 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,1 \cdot x_1 \cdot x_3 - 5,819 \cdot x_1 \cdot x_4 + 33,12 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,9412 \cdot x_2 \cdot x_4 + 80,955 \cdot x_3 \cdot x_4 - y_1 + y_2 - y_3 + y_4, \quad (4.1)$$

де $x_1 = 0,279 \cdot (X_1 - 295,131)$; $x_2 = 0,026 \cdot (X_2 - 30,011)$; $x_3 = 3,55 \cdot (X_3 - 0,036)$;

$x_4 = 131,6 \cdot (X_4 - 0,0005)$; $y_1 = 6,71 \cdot 10^{-6} \cdot (-0,4 \cdot X_1^2 - 0,082 \cdot X_1 + 0,21)$;

$y_2 = 3 \cdot 10^{-4} \cdot (0,26 \cdot X_2^2 - 0,008 \cdot X_2 + 2,6223)$; $y_3 = 3,55 \cdot (-X_3^2 + 3,95 \cdot X_3 + 0,011)$;

$y_4 = 2,18 \cdot (X_4^2 - 1,34 \cdot X_4 + 0,024)$;

– для визначення зменшення чутливості:

$$Y_2 = 8,43 - x_5 + x_6 - x_7 - x_8 - 25,96 \cdot x_5 \cdot x_6 + 4,7 \cdot x_5 \cdot x_7 + 7,76 \cdot x_5 \cdot x_8 + 1,23 \cdot x_6 \cdot x_7 + 12,48 \cdot x_6 \cdot x_8 + 12,24 \cdot x_7 \cdot x_8 - y_5 + y_6 + y_7 + y_8, \quad (4.2)$$

де $x_5 = 0,07 \cdot (X_1 - 290,8)$; $x_6 = 0,038 \cdot (X_2 - 38,24)$; $x_7 = 58,32 \cdot (X_3 - 0,037)$;

$x_8 = 275,16 \cdot (X_4 - 0,00045)$; $y_5 = 3,67 \cdot 10^{-6} \cdot (0,9 \cdot X_1^2 + 0,257 \cdot X_1 + 0,87)$;

$y_6 = 7 \cdot 10^{-4} \cdot (0,09 \cdot X_2^2 + 0,008 \cdot X_2 + 2,62)$; $y_7 = 1,28 \cdot (2,32 \cdot X_3^2 + 1,23 \cdot X_3 + 0,18)$;

$y_8 = 2,18 \cdot (-3,22 \cdot X_4^2 - 1,34 \cdot X_4 + 0,28)$;

– для визначення відтворюваності результатів:

$$Y_3 = 3,85 + x_9 - x_{10} + x_{11} - x_{12} - 3,76 \cdot x_9 \cdot x_{10} - 1,04 \cdot x_9 \cdot x_{11} + 7,93 \cdot x_9 \cdot x_{12} + 25,17 \cdot x_{10} \cdot x_{11} - 4,18 \cdot x_{10} \cdot x_{12} + 8,24 \cdot x_{11} \cdot x_{12} + y_9 - y_{10} - y_{11} - y_{12}, \quad (4.3)$$

де $x_9 = 0,16 \cdot (X_1 - 295,5)$; $x_{10} = 0,008 \cdot (X_2 - 33,3)$; $x_{11} = 4,92 \cdot (X_3 + 0,036)$;

$x_{12} = 11,45 \cdot (X_4 + 0,0043)$; $y_9 = 12,56 \cdot 10^{-6} \cdot (0,34 \cdot X_1^2 + 0,397 \cdot X_1 + 0,075)$;

$y_{10} = 6,4 \cdot 10^{-4} \cdot (0,11 \cdot X_2^2 + 0,013 \cdot X_2 + 9,23)$; $y_{11} = 0,95 \cdot (0,76 \cdot X_3^2 + 0,22 \cdot X_3 + 0,72)$;

$$y_{12} = 17,37 \cdot (2,96 X_4^2 + 0,94 X_4 + 0,03).$$

Тут $x_1 - x_{12}$, $y_1 - y_{12}$ є формулами побудови ортогональних контрастів (перетворення до ортогональних поліномів Чебишова).

Отримані залежності були перевірені на адекватність, відтворюваність і інформативність результатів за критеріями математичної статистики [5].

В результаті встановлено, що усі моделі інформативні ($Fr_{розр} > Fr_{кр}$, $\gamma \geq 2$), адекватні ($F_{розр} > F_{кр}$) та стійкі (cond близьке до 1). Гіпотези перевірялися при рівні значимості $\alpha = 0,05$. Адекватність без повторних дослідів перевіряли за методикою представленою в роботі [8]. Апроксимаційні властивості задовільні. Результати статистичного аналізу представлені в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Статистичні характеристики моделей

Характеристики		Модель		
		Y_1	Y_2	Y_3
Інформативність	R^2	0,6078	0,829	0,997
	Fr розрахункове	10,1	56,52	33,89
	Fr критичне	5,12	5,12	5,12
	γ -критерій Бокса-Веца	2	3	2
Адекватність	F розрахункове	10,85	27,9	21,5
	F критичне	5,59	5,59	5,59
Стійкість	Число обумовленості (cond)	1,06	1,04	1,01
Описові властивості	Похибка апроксимації (%)	3,04	4,08	0,88

Результати повторних досліджень, що проведені в однакових умовах, перевірялися на статистичну відтворюваність за G -критерієм Кохрена [6]. Для всіх регресійних залежностей виконувалася умова $G_{розр} < G_{табл}$ при $\alpha = 0,05$. Тому, ступінь розсіювання результатів за рядками матриці планування однакова.

В результаті статистичного аналізу встановлено, що регресійні залежності адекватні та інформативні, результати відтворені, коефіцієнти регресії статистично значущі. Таким чином, регресійні залежності адекватно описують процес і їх можна використовувати для аналізу й оптимізації процесу визначення мікрогеометрії та механічних характеристик компонентів МСТ методом АСМ.

Характер впливу окремих факторів на відгуки визначається з графіків часткових рівнянь регресії (рис. 4.1 – 4.3).

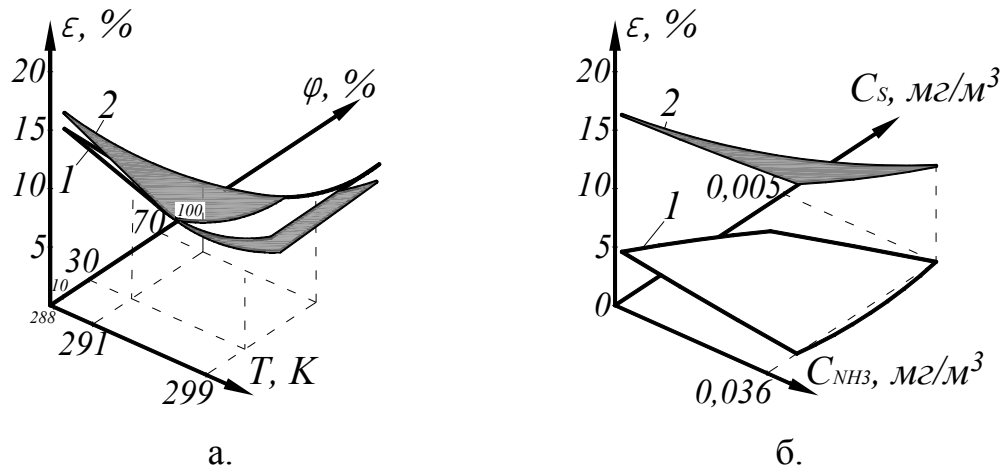


Рисунок 4.1 – Залежності впливу кліматичних факторів оточуючого середовища (температури T , відносної вологості φ , концентрацій з'єднань аміаку C_{NH_3} та сірки C_S) на точність (ε) визначення геометричних та механічних характеристик методом АСМ: а – за умов сталих значень концентрацій з'єднань аміаку C_{NH_3} та сірки C_S (1 – $C_{NH_3} = 0$, $C_S = 0$; 2 – $C_{NH_3} = 0,036$ мг/м³, $C_S = 0,005$ мг/м³);

б – за умов сталих значень температури T та відносної вологості φ

(1 – $T = 291$ К, $\varphi = 30\%$; 2 – $T = 299$ К, $\varphi = 70\%$)

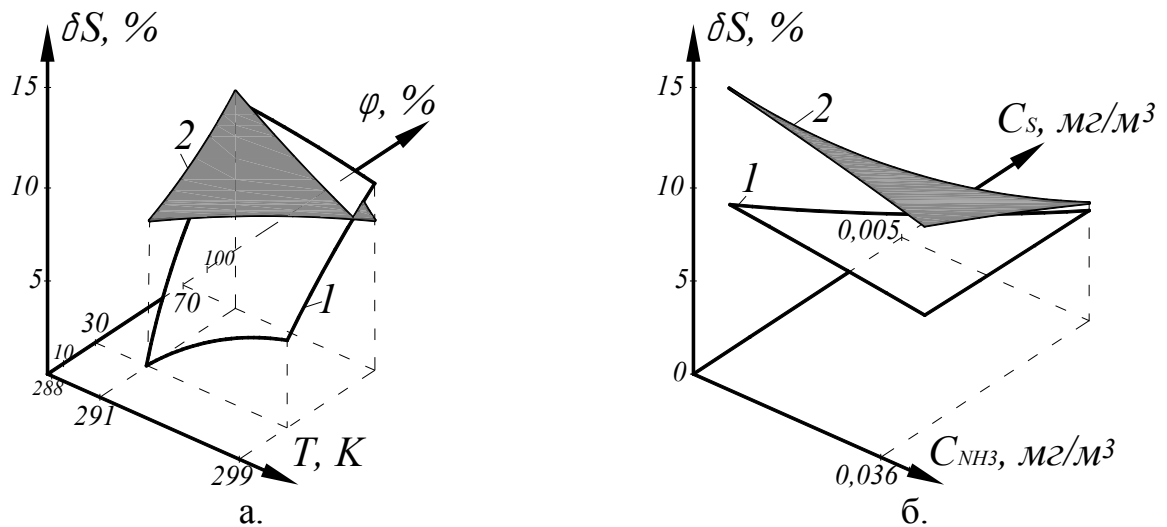


Рисунок 4.2 – Залежності впливу кліматичних факторів оточуючого середовища (температури T , відносної вологості φ , концентрацій з'єднань аміаку C_{NH_3} та сірки C_S) на зменшення чутливості блоку контролю ACM (δS).

Пояснення до рисунку аналогічні поясненням до рис.4.1.

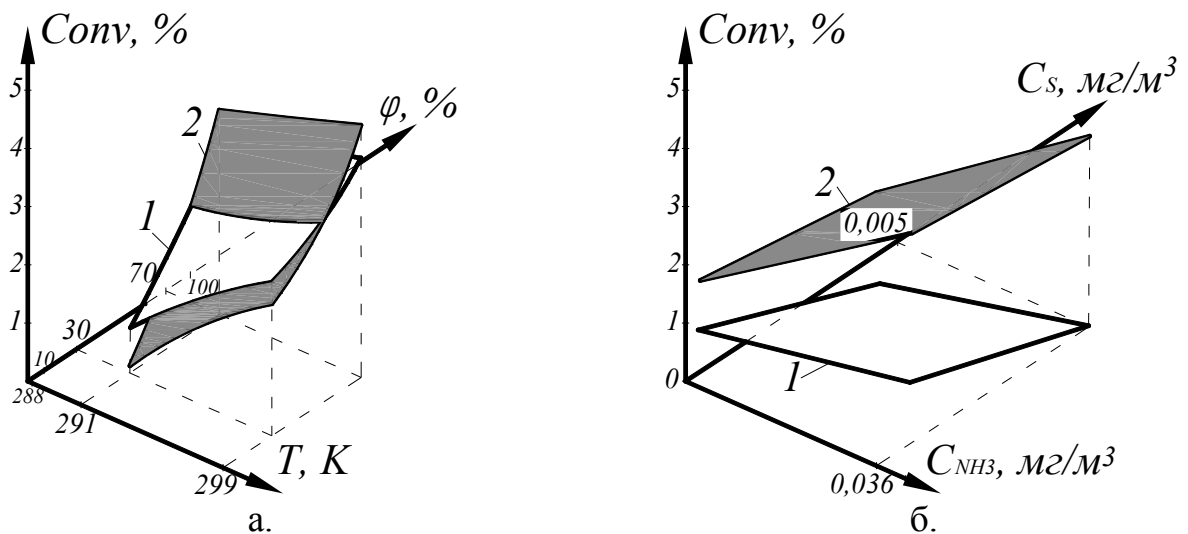


Рисунок 4.3 – Залежності впливу кліматичних факторів оточуючого середовища (температури T , відносної вологості φ , концентрацій з'єднань аміаку C_{NH_3} та сірки C_S) на відтворюваність ($Conv$ – коефіцієнт варіації) результатів контролю геометричних та механічних характеристик методом ACM. Пояснення до рисунку аналогічні поясненням до рис.4.1.

З вищенаведених залежностей (рис. 4.1 – 4.3) зроблено висновки про значущість розглядуваних факторів оточуючого середовища. Так, основний

вплив на точність визначення характеристики методом АСМ чинять температура X_1 (42%), відносна вологість X_2 (35%), менше – концентрація з'єднань сірки X_4 (18,7%) ще менше – концентрація аміаку X_3 (4,3%). Це можна пояснити тим, що зміна температури та відносної вологості оточуючого середовища значно впливають на сили електростатичної та капілярної взаємодії, а звідси – на точність проведення експерименту. В той же час, з'єднання сірки достатньо швидко руйнують покриття срібних електродів п'єзочипу (особливо при підвищеній вологості), тоді як швидкість ерозії поверхні срібла від з'єднань аміаку значно менша.

Зменшення чутливості блоку контролю АСМ значною мірою залежить від таких факторів: відносної вологості – X_2 (21,4%), концентрації аміаку – X_3 (43,7%) та концентрації з'єднань сірки – X_4 (23,3%), менше – від температури X_1 (11,6%). Максимальне зменшення чутливості відбувалося в процесі довготривалого зберігання зондів в умовах підвищеної концентрації з'єднань сірки, аміаку та підвищеної вологості, що утворюють в атмосфері агресивні з'єднання (на відміну від температури, яка в довготривалому терміні зберігання зондів не впливає на їх метрологічні показники), тим самим руйнуючи матеріал зонду АСМ.

На відтворюваність результатів визначення характеристик методом АСМ основний вплив чинять температура X_1 (43%) та концентрація аміаку X_3 (16,5%), в меншому ступені – відносна вологість X_2 (31,3%) та концентрація з'єднань сірки X_4 (9,2%). Цей факт можна пояснити багатофакторним впливом на відтворюваність результатів експерименту, як комбінований вплив силових факторів, так і зміною структури та мікрогеометрії поверхні зонду від її ерозії внаслідок шкідливої дії аміаку.

Таким чином, побудовані за результатами експерименту регресійні залежності метрологічних характеристик методу АСМ залежно від кліматичних факторів оточуючого середовища мають адекватні статистичні властивості і дозволяють проводити обчислювальні розрахунки з метою обрання оптимальних умов проведення контролю методом АСМ.

4.2. Визначення закономірностей впливу робочих параметрів сканування на метрологічні характеристики методу атомно-силової мікроскопії

Друга партія зразків підлягала визначення мікрогеометрії поверхонь при різних значеннях параметрів сканування (швидкості V , кроку h , часу механічної релаксації τ). Попередньо, діапазон значень параметрів сканування обирався за технічними характеристиками АСМ та становив: швидкість $10 \leq V \leq 100$ нм/с (крок зміни швидкості $\Delta V = 10$ нм/с); крок сканування $0,3 \leq h \leq 100$ нм ($\Delta h = 11,1$ нм); час механічної релаксації $0 \leq \tau \leq 9$ мс ($\Delta \tau = 1$ мс). Значення параметрів сканування виставлялися оператором АСМ в програмі керування приладом “SurfaceScan”, а контролювалися в автоматичному режимі самим приладом.

Для оцінки адекватного впливу параметрів сканування була проведена серія експериментів, в результаті яких визначені закономірності впливу параметрів сканування на метрологічні характеристики методу АСМ та побудовано регресійну модель. В моделі, в якості відгуків виступали метрологічні характеристики методу АСМ, а саме: Y_4 – відносна похибка (ϵ , %); Y_5 – зменшення чутливості блоку контролю (δS , %); Y_6 – відтворюваність результатів ($Conv$, %). Найзначиміші фактори та рівні їх варіювання, які прийняті після формалізації наведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Фактори та рівні варіювання при визначенні закономірностей впливу параметрів сканування на метрологічні характеристики методу АСМ

Фактор	Назва фактора	Умовне позначення	Міні-мальне значення	Макси-мальне значення	Крок зміни
X_5	Швидкість сканування	V , нм/с	10	100	10
X_6	Крок сканування	h , нм	0,3	100	11
X_7	Час релаксації	τ , мс	0	9	1

Робоча матриця експерименту та результати його проведення наведено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Робоча матриця експерименту та результати експериментальних досліджень

№ експерименту	X_5	X_6	X_7	Y_4	Y_5	Y_6
1	10	0,3	0	7,8	3,8	2,7
2	20	11	1	5,0	2,0	2,3
3	30	22	2	3,1	0,5	1,9
4	40	33	3	2,0	0	2,0
5	50	44	4	1,8	0	2,7
6	60	55	5	2,1	1,1	3,1
7	70	66	6	3,0	2,6	4,3
8	80	77	7	4,7	4,9	5,8
9	90	88	8	6,6	8,3	7,6
10	100	100	9	10,6	12,1	9,3

Як видно з табл.4.5, найкращі результати показали наступні зразки:

- зразок 5 – найменша відносна похибка;
- зразки 4, 5 – найменше зменшення чутливості блоку контролю;
- зразок 3 – найбільша відтворюваність отримуваних результатів (найменше значення коефіцієнту варіації).

Після обробки результатів експериментальних досліджень побудовано математичні регресійні моделі, які описують залежності критеріїв оптимізації від параметрів сканування [7]:

- для визначення відносної похибки:

$$Y_4 = 10,03 - x_{13} + x_{14} - x_{15} + 19,84 \cdot x_{13} \cdot x_{14} - 0,19 \cdot x_{13} \cdot x_{15} - 32,24 \cdot x_{14} \cdot x_{15} - y_{13} + y_{14} - y_{15}, \quad (4.4)$$

де $x_{13} = 0,0425 \cdot (X_5 - 6,25)$; $x_{14} = 0,035 \cdot (X_6 + 0,3)$; $x_{15} = 0,24 \cdot (X_7 + 1,01)$;

$$y_{13} = 0,06 \cdot (0,01 \cdot X_5^2 - 0,27 \cdot X_5 + 1,87); y_{14} = 0,00258 \cdot (0,22 \cdot X_6^2 - 0,386 \cdot X_6 + 0,094);$$

$$y_{15} = 0,08 \cdot (-1,02 \cdot X_7^2 + 9,57 \cdot X_7 + 23,84);$$

– для визначення зменшення чутливості:

$$Y_5 = 4,44 - x_{16} - x_{17} - x_{18} + 4,25 \cdot x_{16} \cdot x_{17} - 0,7 \cdot x_{16} \cdot x_{18} -$$

$$- 0,84 \cdot x_{17} \cdot x_{18} - y_{16} + y_{17} + y_{18}, \quad (4.5)$$

$$\text{де } x_{16} = 0,065 \cdot (X_5 - 5,24); x_{17} = 0,029 \cdot (X_6 + 2,24); x_{18} = 0,74 \cdot (X_7 + 0,34);$$

$$y_{16} = 70,4 \cdot 10^{-3} \cdot (0,012 \cdot X_5^2 + 0,19 \cdot X_5 - 2,27);$$

$$y_{17} = 1,94 \cdot 10^{-3} \cdot (-0,27 \cdot X_6^2 + 60,11 \cdot X_6 + 0,012);$$

$$y_{18} = 0,05 \cdot (0,05 \cdot X_7^2 + 10,65 \cdot X_7 + 10,24);$$

– для визначення відтворюваності:

$$Y_6 = 2,12 + x_{19} - x_{20} + x_{21} - 0,012 \cdot x_{19} \cdot x_{20} - 2,52 \cdot x_{19} \cdot x_{21} +$$

$$+ 3,24 \cdot x_{20} \cdot x_{21} + y_{19} - y_{20} - y_{21}, \quad (4.6)$$

$$\text{де } x_{19} = 0,101 \cdot (X_5 - 3,25); x_{20} = 0,074 \cdot (X_6 + 3,16); x_{21} = 0,83 \cdot (X_7 + 0,83);$$

$$y_{19} = 34,9 \cdot 10^{-3} \cdot (0,027 \cdot X_5^2 + 0,093 \cdot X_5 + 0,082);$$

$$y_{20} = 1,3 \cdot 10^{-4} \cdot (3,91 \cdot X_6^2 - 7,3 \cdot X_6 + 9,23);$$

$$y_{21} = 0,095 \cdot (-0,56 \cdot X_7^2 + 12,42 \cdot X_7 - 0,52).$$

Тут $x_{13} - x_{21}$, $y_{13} - y_{21}$ – формули побудови ортогональних контрастів.

Отримані залежності також перевірялись на адекватність, відтворюваність та інформативність результатів, табл. 4.6 [5]. Встановлено, що усі моделі інформативні ($Fr_{розр} > Fr_{кр}$, $\gamma \geq 2$), адекватні ($F_{розр} > F_{кр}$) та стійкі (cond близьке до 1). Гіпотези перевірялися при рівні значимості $\alpha = 0,05$.

Результати повторних досліджень, що проведені в однакових умовах, перевірялися на статистичну відтворюваність за G -критерієм Кохрена [6]. Встановлено, що для всіх регресійних залежностей $G_{розр} < G_{табл}$ при $\alpha = 0,05$. Тому, ступінь розсіювання результатів за рядками матриці планування однакова, а результати відтворені.

Таблиця 4.6 – Статистичні характеристики моделей

Характеристики		Модель		
		Y_4	Y_5	Y_6
Інформативність	R^2	0,727	0,918	0,879
	Fr розрахункове	10,1	67,91	30,48
	Fr критичне	4,74	4,74	4,74
	γ -критерій Бокса-Веца	2	3	2
Адекватність	F розрахункове	7,99	14,23	27,28
	F критичне	5,12	5,12	5,12
Стійкість	Число обумовленості (cond)	1,08	1,16	1,01
Описові властивості	Похибка апроксимації (%)	1,73	1,06	1,13

В результаті статистичного аналізу встановлено, що регресійні залежності адекватні та інформативні, результати відтворені, коефіцієнти регресії статистично значущі.

Таким чином, регресійні залежності адекватно описують процес і їх можна використовувати для аналізу й оптимізації процесу контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ методом АСМ.

Характер впливу окремих параметрів на відгуки визначається з графіків часткових рівнянь регресії (рис. 4.4 – 4.6).

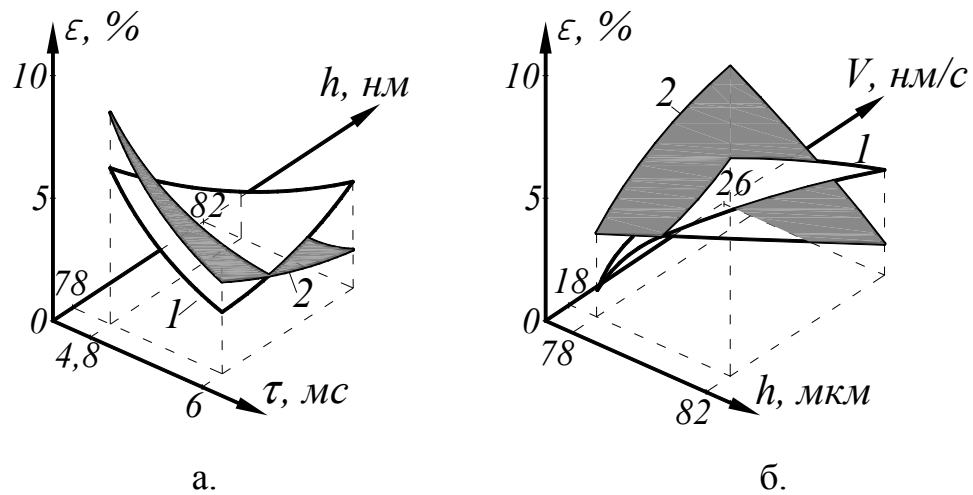


Рисунок 4.4 – Залежності впливу параметрів сканування (кроку сканування h , швидкості V , часу механічної релаксації τ) на точність отриманих даних методом АСМ: а – за умов сталих значень часу механічної релаксації τ (1 – $\tau = 4,5$ мс, 2 – $\tau = 6,6$ мс); б – за умов сталих значень швидкості сканування (1 – $V = 18$ нм/с; 2 – $V = 45$ нм/с)

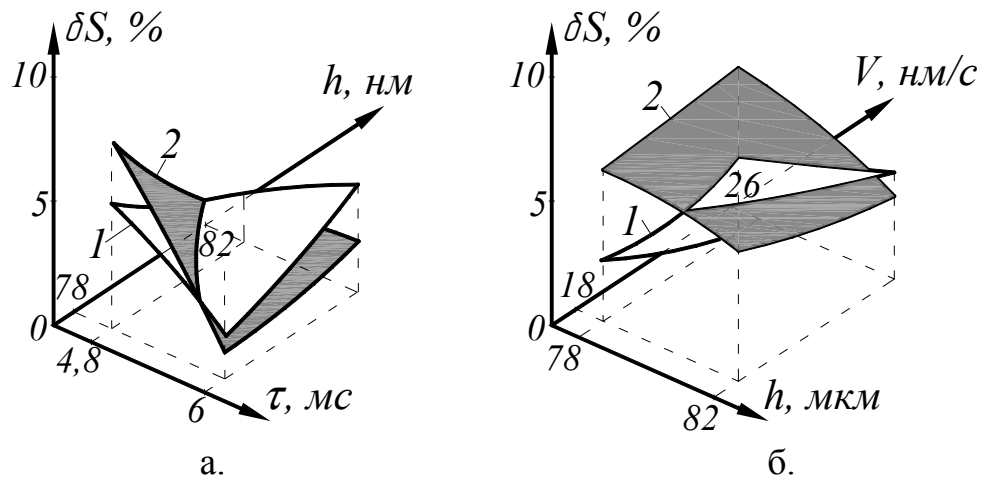


Рисунок 4.5 – Залежності впливу параметрів сканування (кроку сканування h , швидкості V , часу механічної релаксації τ) на зменшення чутливості блоку контролю АСМ (δS). Пояснення до рисунку аналогічні поясненням до рис.4.4.

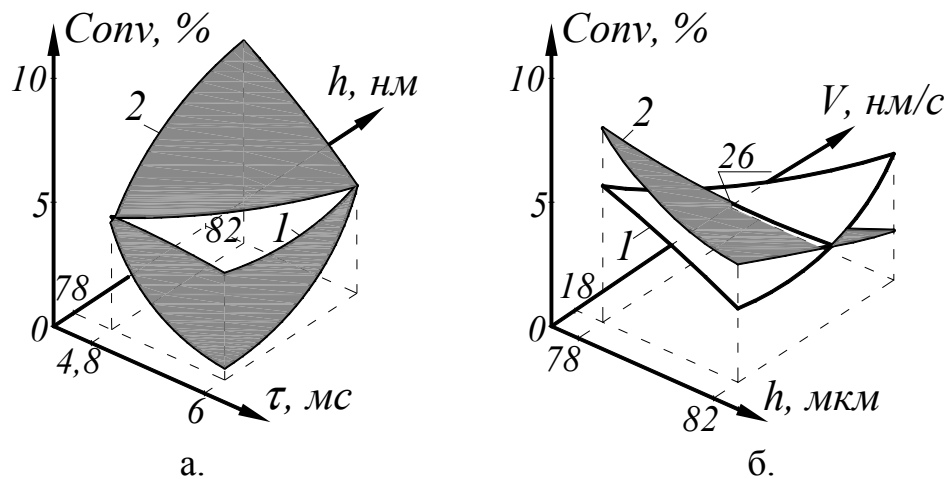


Рисунок 4.6 – Залежності впливу параметрів сканування (кроку сканування h , швидкості V , часу механічної релаксації τ) на відтворюваність ($Conv$ – коефіцієнт варіації) результатів експерименту методом АСМ. Пояснення до рисунку аналогічні поясненням до рис.4.4.

З наведених залежностей (рис. 4.4 – 4.6) зроблено наступні висновки про значущість впливу параметрів сканування. На точність отриманих даних методом АСМ впливають: швидкість X_5 (40,3%), крок сканування X_6 (34,0%) та час релаксації X_7 (25,7%). Суттєвий вплив таких параметрів сканування на точність можна пояснити їхньою залежністю від часу підведення-відведення (швидкість сканування), утримання на поверхні при дослідженні механічних характеристик (час релаксації) та утримання на заданій відстані від поверхні (крок сканування). Цей час, в свою чергу, залежить від дії сил електростатичної взаємодії, яка, як показано в розділі 3, носить домінуючий характер на відстанях порядку одиниць нанометрів до поверхні.

Зменшення чутливості блоку контролю АСМ значною мірою залежить від швидкості сканування (39%) та часу релаксації (43%), менше – від кроку сканування (18%). Як зазначалося вище, максимальне зменшення чутливості відбувалося в процесі довготривалого зберігання зондів. Це призводить до утворення на поверхні зондів з'єднань, що підвищують дію капілярних сил, тим самим зменшуючи чутливість зондів на етапах його підведення та відведення до досліджуваної поверхні.

На відтворюваність результатів експерименту методом АСМ основний вплив чинять усі три фактори: найбільше – швидкість сканування X_5 (38,6%), далі – час релаксації X_7 (32,6%) та крок сканування X_6 (28,8%). Аналогічно до аналізу впливу кліматичних факторів на відтворюваність результатів експерименту, рівнозначний вплив параметрів сканування також може бути пояснений комбінованою дією силових факторів взаємодії зонду з досліджуваною поверхнею.

Таким чином, побудовані за результатами експерименту регресійні залежності метрологічних характеристик методу АСМ залежно від параметрів сканування мають адекватні статистичні властивості і дозволяють проводити обчислювальні розрахунки оптимальних умов проведення контролю методом АСМ.

4.3. Узагальнення результатів впливу кліматичних факторів оточуючого середовища та параметрів сканування на метрологічні характеристики методу атомно-силової мікроскопії

В результаті визначення впливу кліматичних факторів оточуючого середовища та параметрів сканування на точність, чутливість та відтворюваність результатів визначення геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ встановлені залежності (рис.4.1 – 4.6). Комплексний системний аналіз отриманих залежностей дозволив встановити закономірності впливу кліматичних факторів оточуючого середовища та робочих режимів експлуатації на точність, чутливість та відтворюваність результатів визначення геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ.

Як видно із залежностей, наведених на рис.4.1 – 4.3, підвищення температури оточуючого середовища до температури понад 299 К веде до підвищення теплового дрейфу атомів поверхні, чим збільшує відносну

похибку на 3 – 7%, коефіцієнт варіації – на 1 – 2,5% та зменшує чутливість методу на 3 – 5%, а зменшення температури до позначки менше 293 К – погіршує характеристики блоку контролю, що, в свою чергу, збільшує відносну похибку на 8 – 11%

При цьому, збільшення вологості оточуючого середовища до величини понад 70% збільшує відносну похибку на 5 – 8%, коефіцієнт варіації – на 3 – 4% й достовірність результатів дослідження, а також зменшує чутливість методу на 7 – 13%. Це пов'язано з підвищенням ступеня впливу капілярних сил, тоді, як зменшення вологості до значень менше 30% веде до збільшення вільних носіїв заряду та їх рухливості, чим створюється ризик виникнення електричного пробоя між зондом та поверхнею. Це, в свою чергу, веде до руйнування останніх.

В той же час зменшення концентрації аміаку в оточуючій атмосфері до $0,036 \text{ мг/м}^3$, з одночасним зменшенням концентрації з'єднань сірки до $0,005 \text{ мг/м}^3$ дозволяє уникнути корозії срібного покриття системи електродів п'єзочипу та дзеркала системи позиціонування блоку контролю атомно-силового мікроскопу, чим підвищити точність методу на 2 – 4%, чутливість на 5 – 9% та коефіцієнт варіації – до 2,5%.

Проаналізувавши залежності на рис.4.4 – 4.6, зроблено наступні висновки. Час механічної релаксації менший за $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ збільшує відносну похибку визначення механічних величин на 5 – 7% коефіцієнт варіації на 2 – 5,5%, зменшує чутливість методу на 4 – 7%, тоді, як час релаксації більший за $6,6 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ значно збільшує час дослідження ділянки поверхні і, як наслідок, веде до деформування, як досліджуваної поверхні, так і до прискореного “затуплення” вістря зонду АСМ.

З іншого боку, швидкість сканування менша за 18 нм/с та крок сканування менший за 78 нм ведуть до “залипання” зонду до поверхні, тоді як перевищення швидкості сканування понад 45 нм/с та кроку сканування понад 82 нм призводять до збільшення відносної похибки на 8 – 12%, зменшення чутливості на 2 – 6% та відтворюваності – до 3,5%.

З наведених залежностей (рис.4.1 – 4.6) методом векторів переваг проведене експертне оцінювання значущості впливу кліматичних факторів та робочих параметрів на точність, чутливість та відтворюваність результатів при контролі характеристик компонентів МСТ (табл.4.7).

Таблиця 4.7 – Експертна оцінка значущості впливу кліматичних факторів та робочих параметрів процесу контролю на точність, чутливість та відтворюваність методу АСМ

Метрологічні характеристики Кліматичні фактори та параметри процесу контролю	Експертна оцінка значущості впливу різних факторів на:		
	Точність	Чутливість	Відтворюваність
Кліматичні фактори			
Температура, T , К	0,42	0,116	0,43
Відносна вологість, ϕ , %	0,35	0,214	0,313
Концентрація аміаку, C_{NH_3} , мг/м ³	0,043	0,437	0,165
Концентрація з'єднань сірки, C_S , мг/м ³	0,187	0,233	0,092
Робочі параметри			
Швидкість сканування, V , нм/с	0,403	0,39	0,386
Крок сканування, h , нм	0,34	0,18	0,288
Час релаксації, τ , с	0,257	0,43	0,326

За результатами експертного дослідження (табл.4.7) встановлено, що найбільш значущими кліматичними факторами є температура та, в меншому ступені, концентрація аміаку, тоді, як серед робочих параметрів, найзначущими є швидкість сканування та час релаксації.

Подальше удосконалення інструментальної та апаратно-методичної бази забезпечуватиме підвищення точності, чутливості, відтворюваності та надійності контролю геометричних та механічних характеристик

компонентів МСТ, чим покращить дотримання вимог, які висуваються системою міжнародних стандартів.

В результаті проведених розрахунків встановлені раціональні діапазони параметрів зовнішнього середовища та робочих параметрів процесу контролю, а саме: робоча температура (293 – 299) К, відносна вологість (30 – 70)%, концентрації аміаку в оточуючій атмосфері (не більше 0,036 мг/м³) та з'єднань сірки (не більше 0,005 мг/м³), час механічної релаксації $(4,5 - 6,6) \cdot 10^{-3}$ с, швидкість (18 – 45) нм/с та крок сканування (78 – 85) нм. Визначено, що між цими параметрами та даними отриманими в третьому розділі дисертаційного дослідження існує прямий сильний кореляційний зв'язок (показник кореляції $r = 0,93$).

4.4. Уточнення термінів надійної експлуатації та довготривалого зберігання зондів атомно-силового мікроскопу

Для уточнення термінів надійної експлуатації та довготривалого зберігання зондів до атомно-силового мікроскопу були складені та вирішені рівняння регресії для визначення приведених строків експлуатації та зберігання зондів АСМ з використанням методу планування багатофакторного експерименту (див. п.2.2.3).

За основні параметри (відгуки), що підлягали уточненню були обрані: Y_7 – приведений строк експлуатації та Y_8 – строк зберігання зондів АСМ [9] за умови, що ці параметри прагнуть до максимального значення. Незалежними змінними (факторами) були обрані: X_1 – температура оточуючого середовища (T , К), X_2 – відносна вологість оточуючого середовища (ϕ , %), X_3 – концентрація аміаку (C_{NH_3} , мг/м³), X_4 – концентрація з'єднань сірки (C_S , мг/м³), X_5 – швидкість сканування (V , нм/с), X_6 – крок сканування (h , нм), X_7 – час релаксації (τ , мс), (табл. 4.8). При цьому враховувалися наступні умови:

- фізична незалежність вхідних та вихідних параметрів;
- нормальність розподілу ймовірних вимірювань;
- значущість факторів;
- стійкість експерименту до перешкод та порядку виконання вимірювань до ортогональності планування.

Таблиця 4.8 – Фактори та рівні варіювання при визначенні приведених строків експлуатації та зберігання зондів АСМ

Фактор	Кодоване значення фактору	Інтервал варіювання	Рівні факторів		
			верхній	основний	нижній
Робоча температура, Т, К	X_1	3	293	296	299
Відносна вологість, φ , у.о.	X_2	0,2	0,3	0,5	0,7
Концентрації аміаку, C_{NH_3} , мг/м ³	X_3	0,018	0	0,018	0,036
Концентрації з'єднань сірки, C_S , мг/м ³	X_4	0,0025	0	0,0025	0,005
Швидкість сканування, V , нм/с	X_5	13,5	18	31,5	45
Крок сканування, h , нм	X_6	3,5	78	81,5	85
Час механічної релаксації, τ , мс	X_7	1,05	4,5	5,55	6,6

Було складено план семифакторного експерименту [10]. Використовуючи методи статистичного планування n -го порядку, математична модель була отримана у вигляді нелінійного рівняння регресії квадратичної форми для семи факторів:

$$Y_m = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2, \quad (4.7)$$

де x – безрозмірна змінна ($x_i = \frac{X_i - X_i^{(0)}}{\Delta X_i}$).

Для виключення систематичної похибки досліди рандомізовано за допомогою таблиці випадкових чисел. За даними експерименту та запропонованої методики з використанням методу планування

багатофакторного експерименту (див. п.2.2.3) розраховано та обрано найбільш значущі коефіцієнти регресії (у кодованому масштабі):

– для приведеного терміну експлуатації (t_e) зонду АСМ:

$$\begin{aligned} b_0 &= 148 & b_1 &= -0,33 & b_2 &= -12,01 \\ b_{27} &= 0,015 & b_{34} &= -3,38 & b_{56} &= -0,06 & b_{57} &= 29,42 & b_{134} &= -2,12 \end{aligned}$$

– для терміну довготривалого зберігання ($t_{\text{дмз}}$) зонду АСМ:

$$b_0 = 7505 \quad b_1 = -512,12 \quad b_{22} = -97,3 \quad b_{34} = -23,1 \quad b_{134} = 1671$$

Табличне значення t-критерію Стьюдента, відповідно при 28 (для визначення t_e) та при 16 (для визначення $t_{\text{дмз}}$) дослідів та рівні значимості 0,05 складає, відповідно, 2,06 та 2,14.

Отримані експериментально-статистичні моделі дозволили спрогнозувати:

– приведений термін експлуатації (t_e) зонду АСМ:

$$\begin{aligned} t_e &= 148 - 0,33 \cdot (T - 292) - 12,01 \cdot (\varphi - 0,3) - 3,38 \cdot (C_{\text{NH}_3} - 0,036) \times \\ &\times (C_s - 0,005) + 29,42 \cdot (V - 18) \cdot (0,023 \cdot \tau^2 - 0,128\tau) - 0,06 \cdot (V - 26) \times \\ &\times (0,3h - 78) + 0,015 \cdot (312 \cdot \tau^2 - 0,264) \cdot (127 \cdot \varphi^2 - 8,9) - 2,12 \cdot T \times \\ &\times (0,012 \cdot C_{\text{NH}_3}^2 - 0,003) \cdot (0,002 \cdot C_s^2 - 0,0018); \end{aligned} \quad (4.8)$$

– термін довготривалого зберігання ($t_{\text{дмз}}$) зонду АСМ:

$$\begin{aligned} t_{\text{дмз}} &= 7505 - 512,12 \cdot (T - 291) - 97,3 \cdot (1,6 \cdot \varphi^2 + 2,4 \cdot \varphi - 0,35) - \\ &- 23,1 \cdot (C_{\text{NH}_3} - 0,038) \cdot (C_s - 0,008) + 1671 \cdot T^2 \cdot (4,45 \cdot C_{\text{NH}_3}^2 - 0,14) \times \\ &\times (C_s^2 - 0,064). \end{aligned} \quad (4.9)$$

В результаті роботи отриманої моделі були встановлені залежності часу експлуатації t_e (рис.4.7, рис.4.8) та часу довготривалого зберігання (рис.4.9) зонду АСМ $t_{\text{дмз}}$ від кліматичних факторів оточуючого середовища та параметрів сканування.

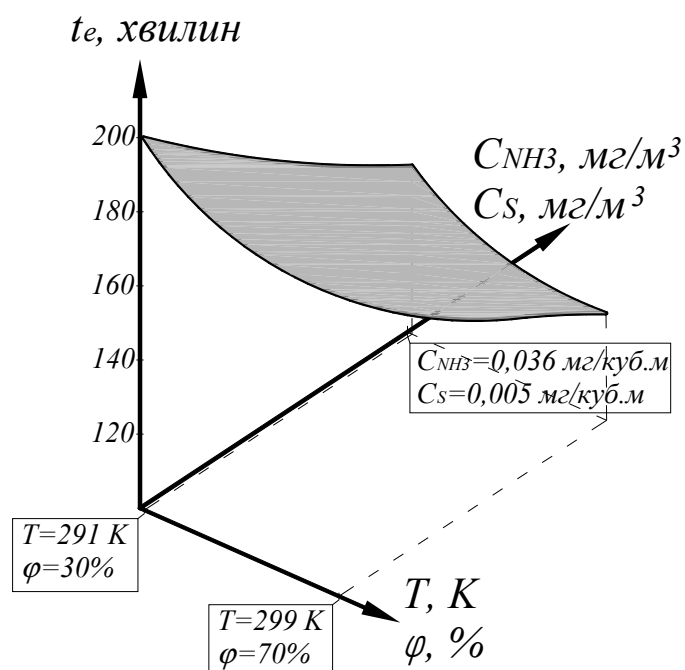


Рисунок 4.7 – Залежності комплексного впливу кліматичних факторів оточуючого середовища (температури T та відносної вологості φ , а також концентрацій з'єднань аміаку C_{NH_3} та сірки C_S) на час експлуатації зонду АСМ

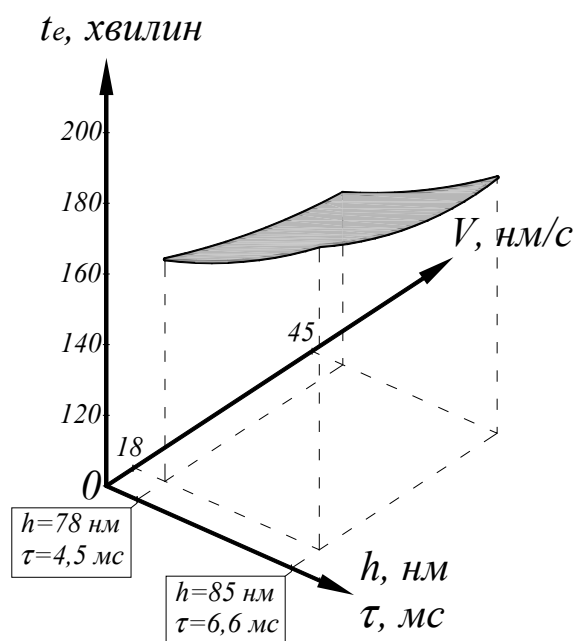


Рисунок 4.8 – Залежності комплексного впливу параметрів сканування (кроку сканування h та часу механічної релаксації τ , а також швидкості сканування V) на час експлуатації зонду АСМ

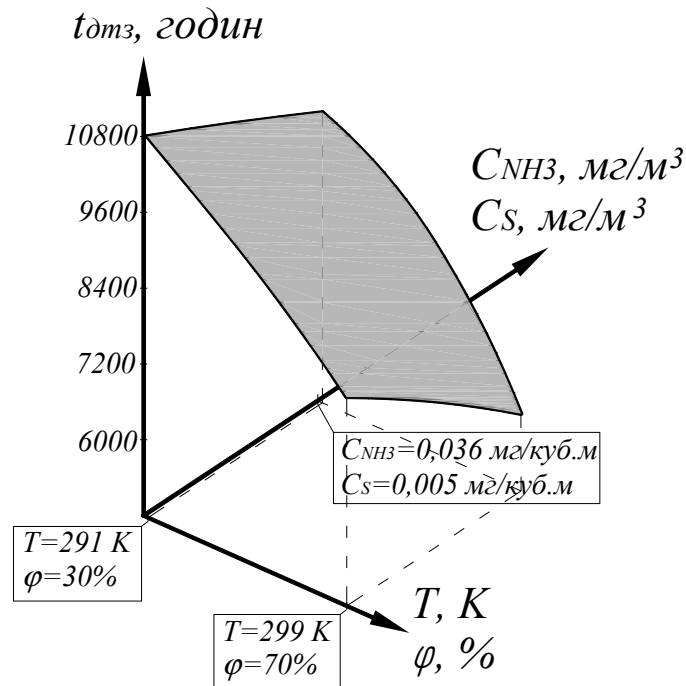


Рисунок 4.9 – Залежності комплексного впливу кліматичних факторів оточуючого середовища (температури T та відносної вологості φ , а також концентрацій з'єднань аміаку C_{NH_3} та сірки C_S) на час довготривалого зберігання зонду АСМ

З отриманих моделей випливає, що збільшення часу механічної релаксації з одночасним збільшенням кроку сканування та зменшенням швидкості сканування, а також температури та вологості оточуючого середовища збільшує час надійної експлуатації зондів зі 120 – 140 хвилин до 160 – 200 хвилин, тоді, як зменшення температури та відносної вологості оточуючого середовища з одночасним зменшенням концентрацій з'єднань аміаку та сірки в повітрі веде до збільшення часу довготривалого зберігання з 7500 – 9000 годин до 9400 – 10800 годин. Розроблена модель дозволяє спрогнозувати максимальний приведений термін експлуатації та термін тривалого зберігання зондів АСМ.

Розв'язуючи регресійні рівняння (4.8) – (4.9) з урахуванням прискореного старіння та необхідності проведення проміжного контролю стану зонду, визначався інтервал часу, через який слід проводити такий контроль. У даному випадку, "нульовий" контроль стану зонду АСМ

здійснюють з використанням еталонних тест-об'єктів. Так, для підтвердження коректності подальшої експлуатації зонду встановлено, що контроль слід проводити не пізніше 16 – 18 хвилин (5 – 8 робочих циклів) від початку експлуатації.

4.5. Висновки до розділу

В розділі досліджено закономірності впливу кліматичних факторів та робочих параметрів сканування в процесі застосування і довготривалого зберігання зондів АСМ на метрологічні характеристики методу атомно-силової мікроскопії, а також встановлені діапазони характеристик, в межах яких підвищується точність, чутливість та відтворюваність результатів контролю при визначенні характеристик компонентів МСТ.

Враховано, що найбільший вплив на експлуатаційні та метрологічні характеристики методу АСМ чинять: кліматичні фактори – при довготривалому зберіганні зонду в умовах повітряної атмосфери; робочі режими експлуатації – в процесі сканування, наноідентування тощо.

Розроблені в розділі нові експериментально-статистичні моделі дозволили встановити нові закономірності за якими оцінити вплив кліматичних факторів та робочих параметрів контролю при застосуванні і довготривалому зберіганні зондів АСМ на точність, чутливість та відтворюваність результатів контролю характеристик компонентів МСТ.

Визначені за допомогою цих моделей прийнятні діапазони зміни кліматичних факторів та параметрів проведення контролю, а саме: робоча температура $T = (293 - 299) \text{ K}$, відносна вологість $30\% < \phi < 70\%$, концентрації аміаку в оточуючій атмосфері $C_{NH_3} \leq 0,036 \text{ мг/м}^3$ та з'єднань сірки $C_S \leq 0,005 \text{ мг/м}^3$, швидкість сканування $V = (18 - 45) \text{ нм/с}$; час механічної релаксації $\tau = (4,5 - 6,6) \cdot 10^{-3} \text{ с}$; крок сканування $h = (78 - 85) \text{ нм}$ корелюють з даними отриманими в результаті математичного моделювання.

Проведення експерименту за вище встановленими діапазонами дозволило збільшити приведений термін експлуатації зонду на 30 – 40%, ймовірність його безвідмовної роботи – з 0,89 – 0,93 до 0,98 та зменшили в 1,2 – 3,4 рази швидкість корозії зонду

Список використаних джерел:

1. С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко, та В. О. Андрієнко, "Переваги використання методу атомно-силової мікроскопії в діагностиці нанооб'єктів та систем", на *X міжнар. наук.-практ. конф. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2018)*, Київ, с. 100-102, 2018.
2. В. А. Ващенко, М. О. Бондаренко та ін. "Діагностика функціональних шарів у виробках мікрооптики і наноелектроніки, отриманих електронними технологіями", Черкаський держ. технол. ун-т, Черкаси, Д/б № 0103U003689, 2004.
3. С. П. Лапач, С. Г. Радченко, и П. П. Бабич, *Планирование, регрессия и анализ моделей PRIAM (ПРИАМ)*. Киев: Каталог программных продуктов Украины, с. 24-27, 1993.
4. С. Г. Радченко, и С. Н. Лапач, "Методология создания новой техники и технологий", *Технологические системы*, №1, с. 41–44, 2003.
5. С. Г. Радченко, *Математичне моделювання та оптимізація технологічних систем*. Київ: ІВЦ "Політехніка", 88 с, 2001.
6. М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, и А. К. Бабаев, "Применение метода атомно-силовой микроскопии в прогнозировании срока эксплуатации пьезоэлектрических преобразователей медицинских приборов", в *VII Междунар. сем. Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии*, Минск, с. 143-147, 2006.

7. С. А. Билоконь, О. В. Свиридова, В. С. Антонюк, М. А. Бондаренко и др., "Повышение точности и срока эксплуатации зондов для атомно-силовой микроскопии", *Наноинженерия*, №1 (19), с. 10-13, 2013.
8. С. А. Билоконь, И. А. Рева, и О. В. Свиридова, "Повышение точности и срока эксплуатации зондов для атомно-силовой микроскопии", на *V міжнар. наук.-техн. конф. Сенсорна електроніка та мікросистемні технології*, Одеса, с. 112, 2012.
9. Ю. Ю. Бондаренко, М. О. Бондаренко, С. О. Білокінь, та В. О. Андрієнко, "Підвищення терміну експлуатації зондів АСМ", на *VII міжнар. наук.-практ. конф. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2017)*, Чернігів, с. 97-99, 2017.
10. Є. Т. Володарський, та Л. О. Кошева, *Статистична обробка даних*. Київ, Україна: НАУ, 308 с, 2008.

РОЗДІЛ 5.

РОЗВИТОК ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ, ТЕХНІЧНОЇ ТА ПРОГРАМНО-МАТЕМАТИЧНОЇ БАЗИ АТОМНО-СИЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТІВ МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ

В розділі наведені основи розвитку інструментальної та апаратно-методичної баз АСМ, що ґрунтуються на розроблених в роботі методичному комплексі, математичних та експериментально-статистичних моделях, та які забезпечуватимуть підвищення точності, чутливості, відтворюваності та надійності контролю геометричних і механічних характеристик пристроїв МСТ, які дозволяють запропонувати принципи створення автоматизованих систем контролю на базі атомно-силових мікроскопів та інструментарію для вимірювання і контролю характеристик пристроїв мікросистемної техніки.

Вперше пропонуються технологічні основи виготовлення інструментарію (зондів та тест-об'єктів) для проведення нанометричного контролю методом АСМ, за допомогою якого можна проводити з високою точністю, відтворюваністю та надійністю комплексний контроль геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ.

На основі розроблених моделей та програмного забезпечення запропоновано нові принципи побудови автоматизованих систем контролю характеристик поверхонь компонентів МСТ методом АСМ.

В якості прикладу реалізації запропонованих принципів та технічних рішень наведені результати створення та функціонування віртуальної лабораторії нанометричних випробувань (ВЛНВ). Показано, що така ВЛНВ дозволяє автоматизувати процес проведення експериментальних досліджень, а також уніфікувати інформацію про мікрогеометрію та механічні характеристики об'єктів контролю для її обміну з іншими інформаційно-аналітичними системами.

5.1. Основні вимоги до конструкції автоматизованих систем контролю на базі атомно-силових мікроскопів

Для визначення вимог до конструкції автоматизованих систем контролю на базі АСМ, а також їх впливу на точність і надійність отриманих даних та на економічність застосування засобів захисту від таких впливів, автором наукового дослідження разом з фахівцями підприємства ТДВ “Микротестмашины” (м. Гомель, Білорусь), що є одним із провідних виробників пристроїв нанометричних досліджень на пострадянському просторі, було проведено аналіз цих вимог та засобів захисту від негативних впливів на конструкцію таких систем, в результаті чого встановлено [1], що основними вимогами, які висуваються до конструкції пристроїв АСМ є: кліматичні вимоги, вимоги до електричної мережі, до зовнішніх механічних впливів та конструкційні вимоги. Основні параметри таких вимог і діапазони їх значень, що забезпечують дотримання надійної експлуатації пристроїв АСМ наведено в табл. 5.1 [1].

Таблиця 5.1 – Параметри вимог до конструкції автоматизованих систем контролю на базі АСМ

Вимоги до конструкції автоматизованих систем	Параметри вимог і діапазони їх значень
Кліматичні вимоги	<ul style="list-style-type: none"> - Температура, 18 – 23 °C - Вологість, $\leq 35 \%$ - Швидкість руху повітря, $< 0,3$ м/с - Відсутність плісняви
Вимоги до електричної мережі	<ul style="list-style-type: none"> - Мережева напруга, $220 \pm 5,5$ В - Пульсації струму в мережі, $\leq 1,5\%$ - Мережева частота, 50 ± 5 Гц - Вплив електромагнітних полів: $E \leq 1 \text{ мкА/м}$; $H \leq 3 \text{ мВ/м}$
Вимоги до зовнішніх механічних впливів	<ul style="list-style-type: none"> - Вібрації, $\leq 1,1$ мм/с - Акустичні коливання $\leq 35 \text{ дБ}$ - Механічні удари: $\leq 0,01$ кг·м/с
Конструкційні вимоги	<ul style="list-style-type: none"> - Ступінь захисту конструкції IP54 - Категорія пожежної небезпеки ДН - Клас електрозахисту I+

Серед шляхів підвищення стійкості виробів до зовнішнього впливу можна виділити такі:

– застосування спеціальних конструкційних рішень, що забезпечуватимуть ефективне охолодження, герметизацію та електрозахист елементів пристроїв АСМ (застосування спеціальних захисних кожухів, першого класу чистоти у приміщенні, засобів електростабілізації та безперебійного живлення, екранів захисту від електромагнітних полів, застосування відеокамери попереднього налаштування пристрою; рознесення окремих блоків (усунення конструкційних впливів);

– раціональний вибір матеріалів елементів конструкції вимірювального комплексу та способів їх захисту (використання діелектриків, деталей конструкції, що не кородують в умовах вологого, біо- та хімічно-агресивного середовища;

– дотримання умов експлуатації, транспортування та збереження пристрою (оптимальні кліматичні умови, умови герметичності, належна вентиляція, електрозахист корпусу приладу згідно IP5, тощо).

Таким чином, можна визначити основні вимоги, що висуваються до розроблюваної автоматизованої системи на базі АСМ “NT-206”, табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Основні вимоги до розроблюваної автоматизованої системи контролю на базі АСМ

Відносна вологість, %	Температура, °C		Тривалість випробувань, годин	Витримка за нормальних умов, год
	Максимальна	Мінімальна		
Вологостійкість при тривалих дослідженнях				
95 – 100	+ 40 ± 2	+ 18 ± 2	7	8 – 12
Теплостійкість				
—	+ 55 ± 2		10	6 – 12
Стійкість до утворення плісняви				
95 – 100	+ 30 ± 2		13	12

Проведений аналіз результатів дослідження показав [1], що основний

вплив на працездатність приладу, точність і надійність отриманих даних здійснюється зовнішніми механічними збуреннями (вібраціями, акустичними шумами та ударами), а найбільші економічні витрати полягають у залучені засобів захисту від кліматичних вимог (до 88% від вартості комплексу пристроїв АСМ). Загалом ступінь впливу цих вимог на точність і надійність отриманих даних та на економічність застосування засобів захисту наведено на рис. 5.1.



Рисунок 5.1 – Діаграми ступеню впливу вимог до конструкції автоматизованих систем АСМ на точність і надійність отриманих даних (а) та на економічність (б) застосування засобів захисту

Більшість сучасних комплексів для нанометричних досліджень виготовляються у настільному варіанті, що передбачає їх розташування в робочій зоні невеликих розмірів та в безпосередній близькості до електрокомунікаційних мереж [2], [3].

Для мінімізації габаритів вимірювального комплексу, максимального усунення перешкод, що виникають в комунікаційних вузлах, зменшення електронних вузлів управління, при розробці автоматизованої системи на базі АСМ для контролю пристроїв МСТ пропонується поєднати в одному форм-факторі у вигляді горизонтального корпусу системного блоку ПК електронні плати, як силового блоку так і керуючого ПК.

Тому, в розділі наводяться шляхи розробки та впровадження автоматизованої системи контролю на базі АСМ.

5.2. Технологічні основи розробки та вдосконалення інструментарію для вимірювання і контролю поверхонь матеріалів методом АСМ

5.2.1. Технологічні аспекти виготовлення інструментарію для проведення нанометричних вимірювань і контролю

З метою виготовлення універсального інструменту, за допомогою якого можна проводити комплексне вимірювання та контроль геометричних та механічних характеристик пристроїв МСТ, автором запропоновані дві концептуально нові технологічні схеми: виготовлення вольфрамових зондів АСМ хіміко-механічним методом з подальшим їх електронно-променевим заточуванням (схема 1) та модифікуванню стандартних кремнієвих зондів тонкими покриттями (схема 2) [4] – [34], опис яких наводиться в Додатку Б.

5.2.2. Виготовлення тестових структур для атомно-силової мікроскопії

Для забезпечення єдності та гарантованої точності вимірювання та контролю характеристик поверхонь матеріалів, що проводяться в нанометровому діапазоні із залученням методу АСМ необхідно проводити первинне та періодичне калібрування зонду за еталонними зразками – тест-об'єктами, що мають гарантовані значення геометрії та механічних характеристик. На сьогодні, відома значна номенклатура тест-об'єктів для повірки наноінструменту, у тому числі й для АСМ. Проте слід зауважити, що в Україні відсутнє виробництво таких об'єктів, а їх постійне використання обмежується значною вартістю та обмеженням по кількості використань (що гарантувало би високу точність повірки).

Через це, доцільним є виготовлення тест-структур із залученням технологій мікроелектроніки, а саме, термовакuumної обробки та електронно-променевого модифікування поверхні матеріалів. З іншого боку, слід розглянути можливість застосування в якості тест-об'єктів природних структур.

В процесі виготовлення тест-об'єктів, властивості, які повинна мати рельєфна структура для використання її, як універсальної лінійної міри для калібрування та перевірки атомно-силових мікроскопів, є наступними [35]:

- рельєфна структура повинна бути структурою з кроком, що відповідає мінімальному розміру зонду (радіусу вістря);
- атестація кроку структури повинна здійснюватися на невеликій ділянці за допомогою інтерференційних методів оптичного випромінювання;
- вимірювання ширини лінії (розмірів верхніх та нижніх виступів і канавок) рельєфної структури має здійснюватися методами РЕМ або АСМ з використанням лише атестованого обладнання та еталону кроку;
- вимірювані розміри елементів структури повинні перекривати великий діапазон розмірів в нанометровій області;
- структура повинна використовуватися для атестації атомно-силових мікроскопів за всіма трьома координатами, використовуючи тільки один атестований розмір;
- структура повинна визначати нелінійність сканування АСМ, неортогональність Z-сканеру та ефективний радіус вістря кантилеверу;
- конструкція структури повинна забезпечувати великий термін служби.

Крім того слід враховувати, що нестандартні тест-об'єкти перед їх експлуатацією повинні бути перевірені з максимально можливою роздільною здатністю на атестованому приладі з використанням нового стандартного зонду АСМ, що раніше не був в експлуатації.

Автором дисертаційного дослідження запропоновано технологічні основи виготовлення тестових структур для АСМ, рис.5.2. В основі процесу виготовлення тестових структур лежить комбінований метод резистивного осадження на основу з оптичного кварцового скла тонкого (менше 20 нм) покриття золота (Au) у вакуумі (робочий вакуум 10^{-3} Па, енергія випаровування 1200 Дж, температура випаровування 550 – 600 °С, час нанесення покриття 13 – 18 с).



Рисунок 5.2 – Технологічна схема виготовлення тестових структур для АСМ

Далі відбувається модифікування зонду методом стрічкового електронно-променевого впливу (робочий вакуум 10^{-6} Па, розподіл електронного потоку по поверхні – дискретний, питома потужність електронно-променевої гармати $2,25 \text{ Вт/мм}^2$, швидкість руху електронного потоку, не менше 10 мм/с) через знімну молибденову маску [36].

В цілому, технологія виготовлення тестових структур аналогічна технології модифікування стандартних кремнієвих зондів (див. п.5.2.1).

Після завершення основного технологічного циклу виготовлення тест-об'єкту комбінованим методом електронно-променевої обробки були отримані структури зі смужок Au на склі з періодом $3017 \pm 50 \text{ нм}$. Висота структури визначалася товщиною плівки Au, виміряної методом, описаним в роботі [25], і становила $h = 656 \pm 1 \text{ нм}$. Кути φ нахилу бічних стінок структури (для надання трапецієподібної форми профілю) задавалися швидкістю ізо-топного травлення Au в хлористо-азотній кислоті і становили 40° , рис. 5.3.

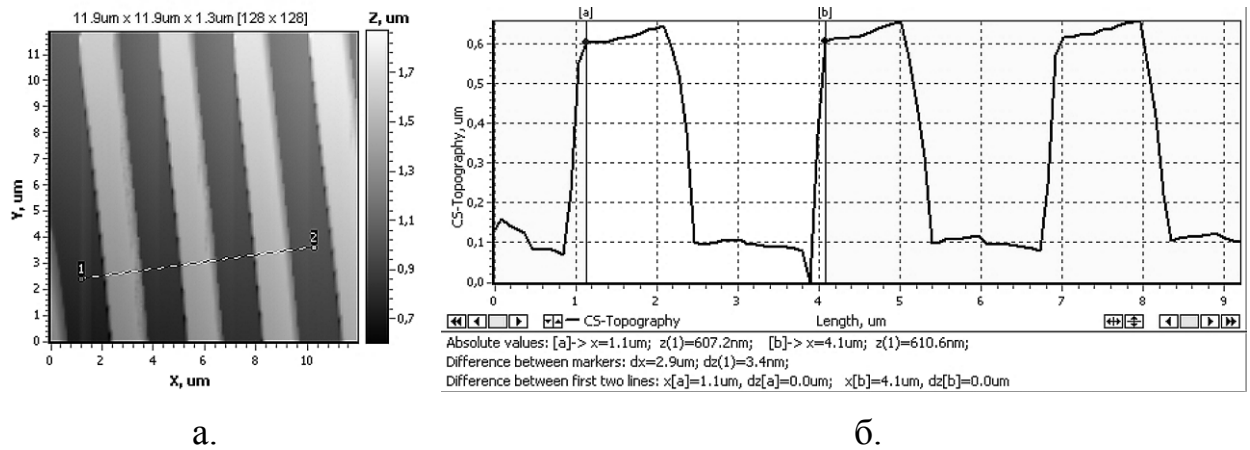


Рисунок 5.3 – АСМ-зображення (а) та профіль (б) виготовлених за запропонованою технологією періодичних (крокових) структур з періодом 3 мкм

Таким чином, запропонована технологія виготовлення тестових структур для АСМ дозволяє отримувати тест-структури з широким діапазоном вимірювальних параметрів, застосування яких мінімізує виникнення артефактів АСМ-зображень, підвищує роздільну здатність і надійність отриманих результатів, а також дозволяє своєчасно виявляти пошкоджені зонди для АСМ.

5.2.3. Перспективи використання нестандартних структур в якості тест-об'єктів для атомно-силової мікроскопії

При проведенні комплексного контролю мікрогеометрії та механічних характеристик матеріалів методом АСМ обов'язковою є потреба у проміжному тестуванні системи контролю по структурі з відомими (еталонними) значеннями цих характеристик. Це дозволяє з високою точністю визначати мікрогеометрію та механічні характеристики поверхонь пристроїв МСТ шляхом компенсації помилки контролю через порівняння цих параметрів з параметрами, отриманими за результатами сканування тест-структури. В той же час, багаторазове сканування в статичному режимі таких тест-структур може привести до затуплення вістря зонду.

Автором пропонується використовувати в якості тест-об'єктів для АСМ деякі прості та доступні природні або штучні нестандартні структури. Для калібрування зонду АСМ, визначення гістерезису та усунення дисторсії п'єзосканеру рекомендується використовувати фрагменти штампів для виготовлення DVD-дисків та голограм, використовуваних для маркування продукції (рис.5.4).

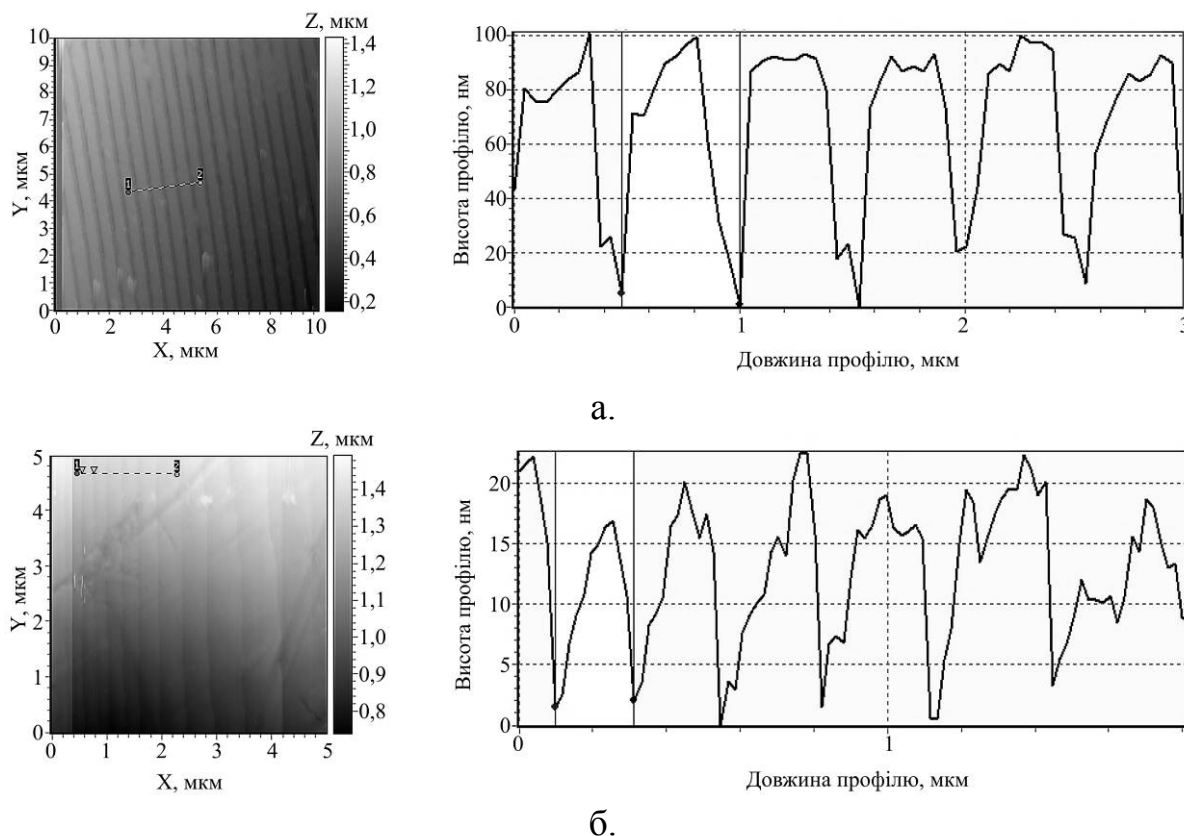


Рисунок 5.4 – АСМ-зображення ділянки поверхні штампу (10×10 мкм) DVD-диску (а) та голограми (5×5 мкм) (б): зліва – топографічне зображення ділянки; справа – профіль поверхні вздовж лінії 1-2

Поверхнева структура цих структур складається з паралельних смужок однієї висоти і постійного періоду. Висота смужок і відстань між ними змінюється на різних фрагментах візерунка поверхневої структури розміром в кілька міліметрів. Висота смуг на цих об'єктах коливається від 15 до 150 нм в залежності від об'єкту та фрагменту візерунка. Період смужок може змінюватися від 215 до 500 нм. В рамках поля сканування ці параметри зберігаються приблизно постійними. Відхилення в розмірах не більше 5%.

Для контролю за змінами розміру і форми вістря зонду, а також для визначення еталонної зносостійкості, автором пропонується використовувати тонкі пластинки пірографіту УПВ-1 або корунду Al_2O_3 . Структура представляє собою гексагональну щільну упаковку сферичних кристалітів діаметром близько 100-200 нм (рис. 5.5). Якщо вістря зонда затуплюється, розмір півсфер збільшується і форма відхиляється від правильної сферичної.

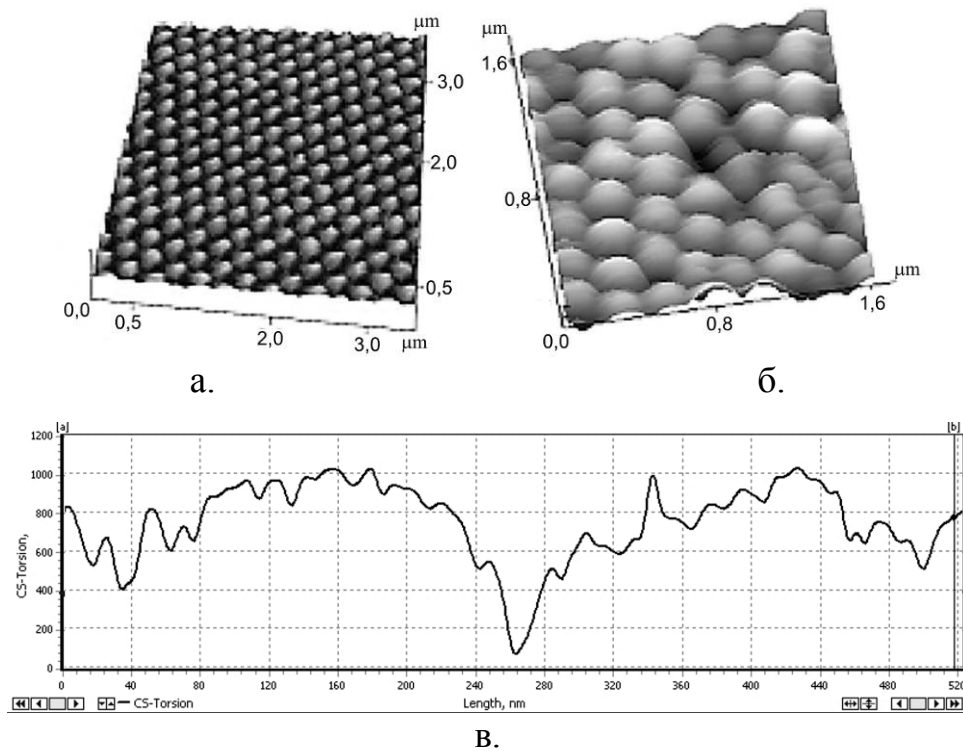


Рисунок 5.5 – Трьохвимірне АСМ-зображення поверхні (а – поле сканування 3,5×3,5 мкм пірографіту; б – поле сканування 1,6×1,6 мкм корунду) та профіль (в) вздовж лінії А-В по пластинці корунду (Al_2O_3)

З іншого боку, для встановлення безрозмірного показника зносостійкості k , проводячи склерометричні випробування еталонного зразка корунду ($k_{\text{корунд}} = 90$), отримують поправочний коефіцієнт l , який використовується для корегування розрахунків зносостійкості МСТ:

$$l = \frac{k_{\text{ет}} - k_{\text{корунд}}}{k_{\text{корунд}}}; \quad (5.1)$$

$$k = k_{\text{вим}} - l \cdot k_{\text{вим}}, \quad (5.2)$$

де $k_{\text{ет}}$, $k_{\text{вим}}$ – коефіцієнти зносостійкості, отримані при контролі зондом,

відповідно, еталонного та досліджуваного зразка

В якості повірногого тест-об'єкту для визначення мікротвердості та зношуваності зарекомендував себе монокристалічний кварц, як найбільш однорідний та гомогенний еталонний зразок, що має високу хімічну стійкість та низький коефіцієнт теплового розширення (ISO 6507-1:2005, ISO / TR 29381:2008). В якості таких еталонних тест-об'єктів в рамках даного дисертаційного дослідження обиралися кварцові пластинки 30×30×2 мм (виробник: ПАТ “Укрп’єзо”, м.Черкаси), з відомою мікротвердістю поверхні $H_v = 3,02$ ГПа та зносостійкістю $k = 72$. Далі, застосовуючи методику визначення мікротвердості та зносостійкості поверхонь матеріалів (п.2.4.1) отримувалися відбитки наноіндентора та треки зношуваності поверхні при відомих значеннях навантаження на зонд АСМ, рис.5.6.

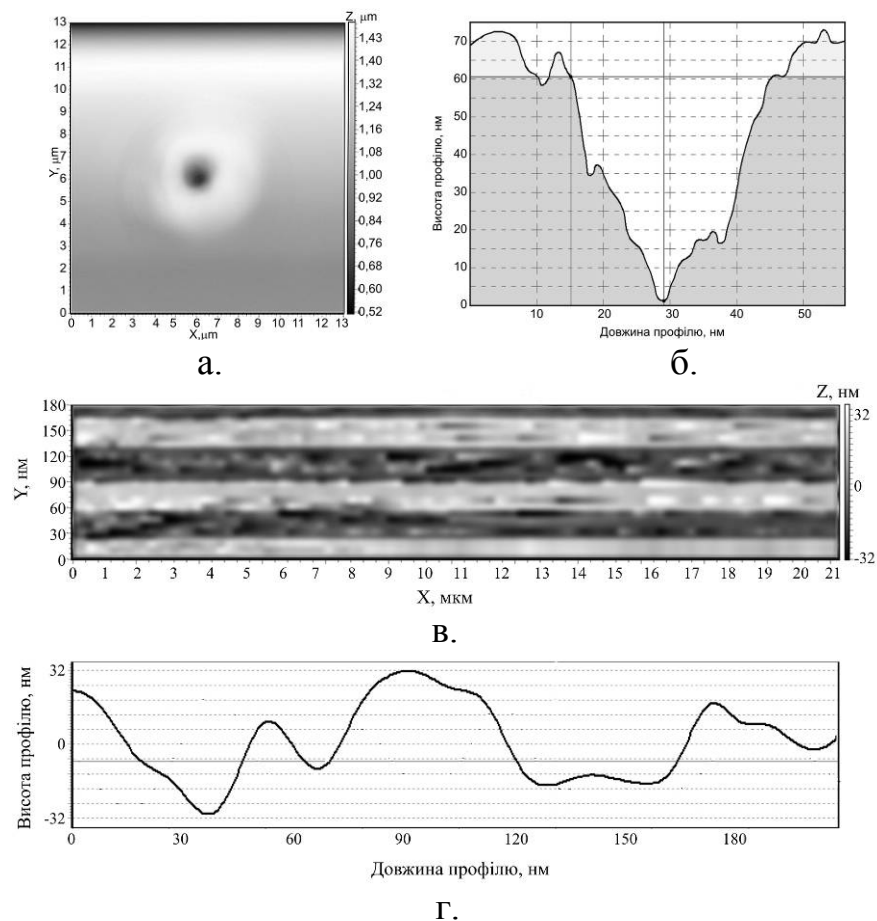


Рисунок 5.6 – АСМ-зображення (а, в), профіль (б, г) поверхні кварцової пластини з відбитком наноіндентора (а, б) та результатом склерометрії (в, г)

Після вимірювань, які проводилися в 25 точках по всій пластині та

подальших обрахунків, отримувалися значення мікротвердості ($H_v = 3,02 \pm 0,11$ ГПа) та критерій зносостійкості ($k = 71,3 \pm 2,7$) поверхні кварцу. Як видно за результатами порівняння експериментальних та еталонних даних, похибка визначення мікротвердості кварцових тест-об'єктів не перевищує 3,6%, а безрозмірного критерію зносостійкості становить не більше 4,8%, що є допустимим та доводить можливість використання монокристалічного кварцу в якості еталонного тест-об'єкту для визначення мікротвердості та зношуваності у методі АСМ.

Для калібрування автоматизованих систем АСМ, що використовуються для контролю параметрів поверхонь з невисокою жорсткістю, можливе використання деяких біологічних об'єктів. Так, в роботі [37] пропонується в якості тест-об'єктів з високою відтворюваністю результатів використовувати зразки бактерії “*Ervinia carotovora*”, які були зафіксовані на склі, рис.5.7.

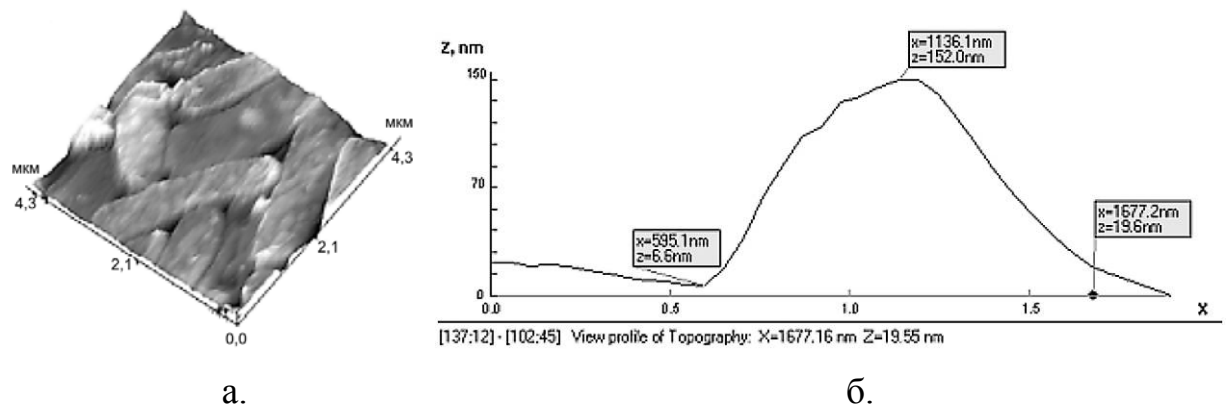


Рисунок 5.7 – АСМ-зображення бактерій “*Ervinia carotovora*” [34]:

а – АСМ-зображення, поле сканування 4,3×4,3 мкм; б – профіль поверхні

Дані бактерії мають форму еліпсоїдних паличок із середньою довжиною 2 мкм, шириною 600 – 700 нм і висотою 150 нм. Висока точність калібрування системи контролю досягається, коли крім форми і розміру тіла бактерії, методом АСМ можна визначити її внутрішню структуру: ядро і глобули на поверхні.

Проте використання зразків бактерій “*Ervinia carotovora*” в якості еталонних тест-об'єктів для калібрування автоматизованої системи АСМ при

проведені контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ, яке проводиться в контактному режимі не є доцільним через низьку жорсткість оболонок бактерій – зонд, в процесі калібрування, буде “зрізати” досліджувані об’єкти шар за шаром.

Таким чином, використання пропонованих нестандартних тестових структур в дослідженнях, що проводяться методом АСМ дозволить контролювати мікрогеометрію та механічні характеристики поверхні пристроїв МСТ шляхом компенсації помилки вимірювання через порівняння цих параметрів з параметрами, отриманими за результатами сканування тест-структури, а також компенсувати нелінійність п’єзосканеру приладу та визначати зміну форми зонду в процесі роботи приладу і обирати оптимальну силу притиснення зонда до поверхні та швидкість зворотного зв'язку в процесі контролю.

5.2.4. Аналіз результати калібрування атомно-силових мікроскопів при використанні тест-об’єктів

Як показали результати дослідження якісних характеристик (періоду та висоти періодичних структур, куту нахилу та висоти структурних елементів поверхні, тощо) при виготовленні тест-зразків та застосуванні нестандартних тест-об’єктів, останні можна використовувати в якості засобів періодичної повірки зондів АСМ. При цьому, розбіжність між результатами визначення форми, розмірів вістря зонду, його мікротвердості та зносостійкості за даними отриманими на еталонних зразках та нестандартних тест-об’єктах не перевищує 5%, що є допустимим при контролі геометричних та механічних характеристик поверхонь пристроїв МСТ.

Проте, використання запропонованих тест-об’єктів в якості засобів первинної повірки без належної їх перевірки на відповідність дотримання вимогам стандартів в області метрологічного наноконтролю є недопустимим.

Надійним способом оцінювання метрологічних характеристик таких об'єктів є їхня повірка з використанням сертифікованих еталонів і зразкових засобів вимірювання та контролю [38], [39]. Для цього в роботі було проведено аналіз результатів калібрування АСМ при використанні виготовлених тест-об'єктів та еталонних зразків.

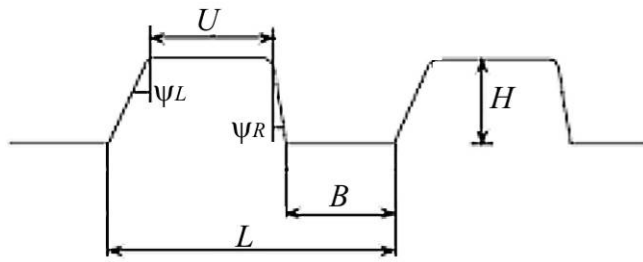
Найбільш зручно проводити калібрування шкал АСМ за допомогою трапецієподібних структур з великими кутами нахилу бічних стінок, виконаних за технологією анізотропного травлення (див. п.4.2.1) [40].

Експеримент проводився на пристрої “NT-206” зі стандартним кремнієвим зондом CSC38 (радіус вістря $r_{em} = 8$ нм). В якості тестової структури застосовувалася крокова структура виготовлена автором дисертаційного дослідження (див. рис.5.3); як еталонний зразок, використовувалася тестова решітка МШПС-2.0К (виробник: “НТ-МДТ”, м.Москва, Росія) [41], [42], що мала наступні параметри: розміри верхніх та нижніх ділянок виступів і канавок, відповідно: $u = 3810$ нм; $b = 5079$ нм; $h = 1690$ нм; $\varphi = 40^\circ$ (0,698 рад) Використовуючи визначені приладом середні значення періоду $L = 3017 \pm 50$ нм та висоти рельєфу $H = 656 \pm 1$ нм структури виготовленої автором, та враховуючи кількість кроків, здійснюваних автоматизованою системою приладу в процесі сканування рельєфу ($z_x = 1024$; $z_z = 256$) отримувалися ціни поділки шкал атомно-силового мікроскопу:

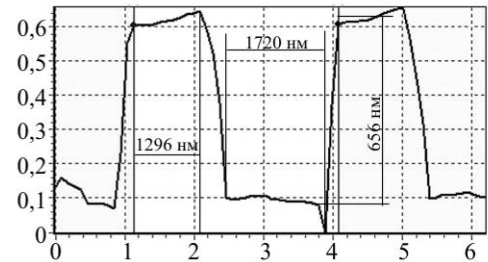
$$m_x = L / z_x = 3017 \pm 50 / 1024 = 2,946 \pm 0,049 \text{ нм/піксель};$$

$$m_z = h / z_z = 656 \pm 1 / 256 = 2,563 \pm 0,004 \text{ нм/піксель}.$$

Подальше визначення розмірів верхніх (U) та нижніх (B) ділянок виступів і канавок структури та висоти її рельєфу (H) (рис.5.8) дозволило визначити теоретичні значення півосей вістря зонда, у випадку, коли останній має форму півеліпсу:



а.



б.

Рисунок 5.8 – Схема (а) та профілограма АСМ-зображення (б) тест-об'єкту для визначення його геометричних параметрів

$$r_x = \left| \frac{\frac{m_x U - u}{2} + \frac{m_x B - b}{2}}{Q_{mo}(\varphi) + \frac{Q_{em}(\varphi) - Q_{mo}(\varphi)}{2}} \right|, \quad (5.3)$$

$$r_x = \left| \frac{\frac{2,946 \cdot 1296 - 3820}{2} + \frac{2,946 \cdot 1720 - 5079}{2}}{0,923 + \frac{0,933 - 0,923}{2}} \right| = 7,478 \text{ нм};$$

$$r_z = \left| \frac{m_z H - h}{Q_{mo}(\varphi) + \frac{Q_{em}(\varphi) - Q_{mo}(\varphi)}{2}} \right|, \quad (5.4)$$

$$r_z = \left| \frac{2,563 \cdot 656 - 1690}{0,923 + \frac{0,933 - 0,923}{2}} \right| = 9,344 \text{ нм}.$$

Тут, $Q(\varphi)$ – повірочний коефіцієнт:

$$Q(\varphi) = 2 \cdot \frac{1 - \sin\left(\frac{\psi_L + \psi_R}{2}\right)}{\cos\left(\frac{\psi_L + \psi_R}{2}\right)}; \quad (5.5)$$

$$Q_{mo}(\varphi) = 2 \cdot \frac{1 - \sin\left(\frac{0,671 + 0,741}{2}\right)}{\cos\left(\frac{0,671 + 0,741}{2}\right)} = 0,923 \text{ - для тест-об'єкту, запропонованого}$$

автором, $Q_{em}(\varphi) = 2 \cdot \frac{1 - \sin(0,698)}{\cos(0,698)} = 0,933$ - для еталонної тестової решітки;

значення геометричних параметрів тестової структури, відповідно: $U = 1296 \pm 21$ нм; $B = 1720 \pm 28$ нм; $H = 656 \pm 1$ нм; значення кутів тестової структури, відповідно: $\psi_L = 38,48^\circ$ (0,671 рад); $\psi_R = 42,46^\circ$ (0,741 рад).

Для остаточного визначення розрахункового значення радіусу вістря зонду $r_{розр}$, вважається, що значення периметру теоретичного півеліпсу співпадає зі значенням периметру половини кола (для спрощення розрахунків, форма профілю вістря зонду приймається за півколо):

$$r = \frac{2\pi r_x r_z + 2(r_z - r_x)^2}{\pi(r_x + r_z)}, \quad (5.6)$$

$$r = \frac{2\pi \cdot 7,478 \cdot 9,344 + 2(9,344 - 7,478)^2}{\pi(7,478 + 9,344)} = 8,44 \text{ нм.}$$

Таким чином, відхилення значення радіусу вістря зонду, отриманого за допомогою тест-об'єктів виготовлених автором дисертаційного дослідження від його еталонного значення не перевищує 0,44 нм (відносна похибка визначення радіусу стандартного зонду CSC38 при його калібруванні по розробленій кроковій решітці не перевищує $\delta r = \left| \frac{r_{em} - r}{r_{em}} \right| = \frac{8 - 8,44}{8} = 0,055$, тобто 5,5%), що є допустимим згідно SO/IEC 17025:2005.

Паралельні випробування цих структур за допомогою АСМ на базі атестованого вимірювального обладнання ТДВ “Микротестмашины” (Акт про практичне використання та впровадження у виробничі процеси, додаток В), показали високу якість та точність отриманих структур.

Проте, слід зауважити, що виготовлена структура мала й низку недоліків. По-перше, в результаті надмірного часу травлення, кут φ сильно змінювався через недоліки технології виготовлення (локальні дефекти плівки Аи, погане перемішування рідинного травника, локальні зміни температури травлення тощо). По-друге, рівність і лінійність западин та виступів з

діоксиду кремнію погано контролюються і в ряді випадків недостатні для проведення точних вимірювань.

У результаті встановлено, що геометричні параметри вимірювання стандартної тест-решітки TGZ3 (висота 520 ± 3 нм, період $3 \pm 0,05$ мкм), визначені з отриманих АСМ-зображень, корелюють з табличними даними. При цьому геометричні параметри вимірювання тестової структури, виготовленої за технологією запропонованою автором (висота 656 ± 1 нм, період 3017 ± 50 нм), що визначаються АСМ-зображеннями, отриманими за допомогою стандартного кремнієвого зонду CSC38, не відповідають табличним даним для тест-решітки TGZ3 і мають велику розбіжність між параметрами виготовлених тест-об'єктів.

Таким чином, результати калібрування АСМ за допомогою виготовлених у вище заявлений спосіб тест-об'єктів, показали високу точність дотримання геометрії профілю таких тестових структур, та, разом з цим, дозволили визначати поправочні коефіцієнти для встановлення форми та розмірів вістря зонду АСМ. Тому можна зробити висновок про доцільність використання виготовлених тест-об'єктів в якості універсальних мір, що дозволяють визначати та корегувати геометричні параметри зонду АСМ.

5.3. Розробка імітаційної моделі автоматизованої системи контролю

Для підвищення точності, чутливості та відтворюваності результатів контролю методом АСМ запропоновано комплекс дій, а саме – вдосконалення окремих елементів та вузлів апаратного забезпечення цього методу. Це дозволить максимально автоматизувати процес контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ. Для цього проводиться імітаційне моделювання автоматизованої системи контролю. Складання імітаційної моделі проводилося з метою визначення раціональних параметрів контролю за допомогою АСМ, що дозволило б спростити процес

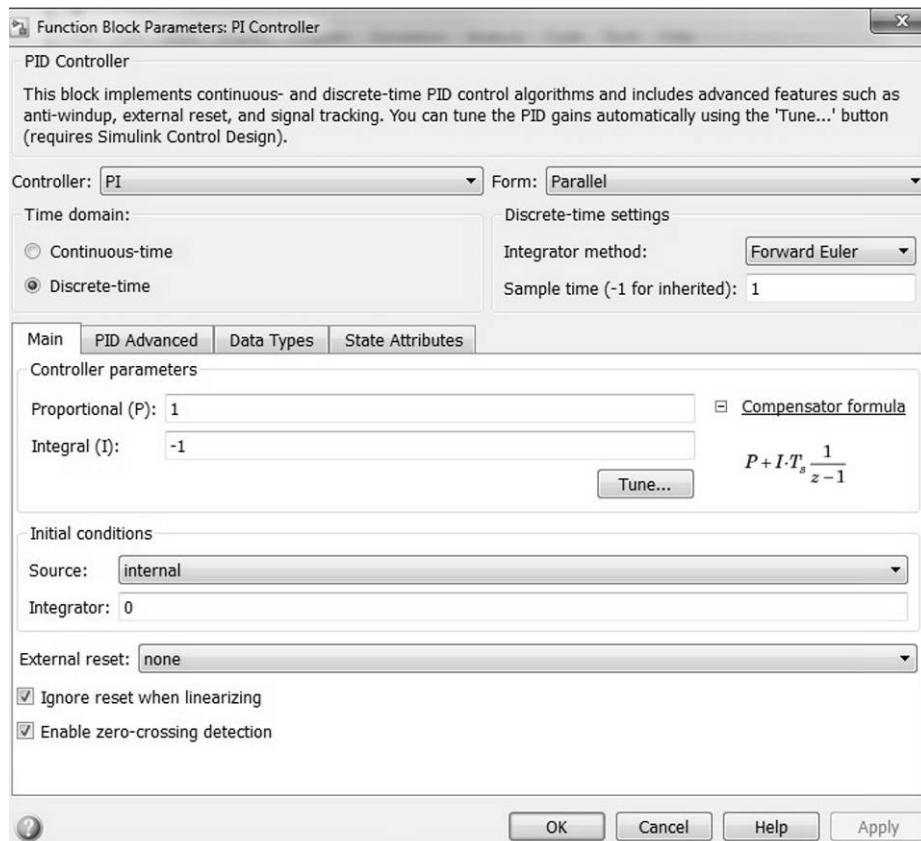


Рисунок 5.10 – Інтерфейс блоку PI Controller

За налаштування параметрів автоматизованої системи контролю відповідають блоки: Const1 – давач збудження постійного впливу, Const2 – давач постійних обертів п'єзодвигуна, Егг – пропорційно-інтегральна ланка обробки помилок. Блоки давачів з'єднані з підсилювачами Аmр, які дозволяють налаштувати коефіцієнти перетворення їх сигналів. Змінюючи величину посилення можна домогтися різноманітного поведінки системи. В той же час, ПІ-контролер зворотного зв'язку PI Controller задає коефіцієнти підсилення підсилювача k_p та інтегратора k_i .

Ставлячи значення параметра рівним нулю, можна створити тільки пропорційний або тільки інтегральний блок. Величина обмеження напруги необхідна для захисту автоматизованої системи і не може бути змінена.

Слід з обережністю виставляти усі коефіцієнти, оскільки неправильне їх виставлення може привести до того, що система стане нелінійною, що є неприпустимим.

Для швидкого і зручного установаження системи в моделі передбачено

два ключа, керованих вручну. SW4 дозволяє включати або відключати зв'язок по давачу Const1. SW2 дозволяє включати або відключати зворотний зв'язок по давачу Const2. Відключення зв'язку по давачу рівнозначно тому, що в давачі встановлюється коефіцієнт посилення рівний нулю.

Блок Eгг також здійснює контроль за лінійністю вимірювальної системи. Якщо система стає нелінійною, то симуляція припиняється і на інформаційне табло Score3 видається повідомлення про відповідну помилку. Зазвичай це відбувається при неправильному виставлянні коефіцієнтів посилення.

Режими моделювання вимірювальної системи. Засоби управління імітаційною моделлю та параметрами сеансу моделювання надає досліднику вікно “Configuration Parameters” (параметри налаштування), рис.5.11, елементи управління на вкладці “Solver options” якого зібрані в три групи.

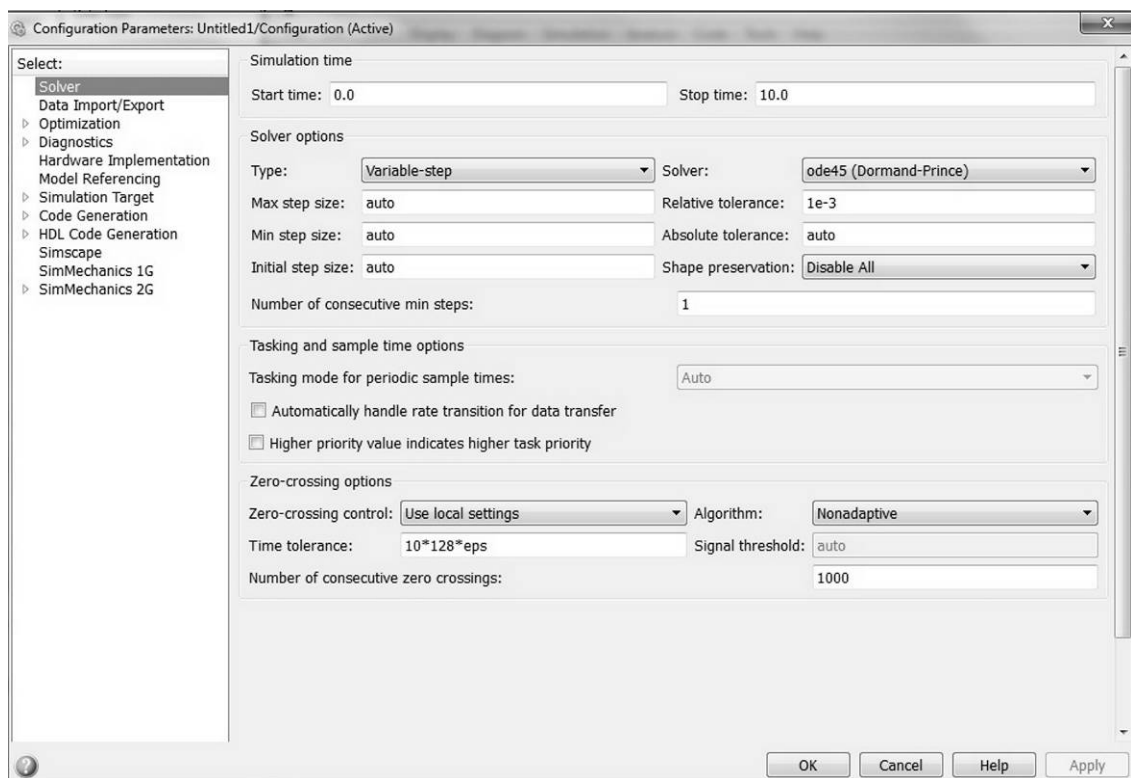


Рисунок 5.11 – Вікно установки параметрів моделювання

У вікні “Simulation time” (інтервал моделювання) – проводиться вибір інтервалу моделювання за допомогою вказівки початкового (Start time) і кінцевого (Stop time) значень модельного часу.

“Solver options” (параметри розрахунку) – вибір методу реалізації (розрахунку) моделі.

Під вибором методу реалізації моделі мається на увазі наступне. Маючи структуру досліджуваної системи у вигляді блок-діаграми, обирається метод відображення ходу моделювання. За допомогою двох розкладних списків “Type” система може бути реалізована в наступних формах:

- з дискретними станами та часом переходу з одного стану в інший;
- з дискретними станами і безперервним часом переходу;
- з безперервними станами і дискретним часом переходів;
- з безперервними станами і безперервним часом переходів.

Перший список дозволяє обрати спосіб зміни модельного часу:

- “Variable-step” (змінний крок) – моделювання зі змінним кроком;
- “Fixed-step” (фіксований крок) – моделювання з фіксованим кроком.

Другий список дозволяє обрати метод розрахунку нового стану системи. Перший варіант (discrete) забезпечує розрахунок дискретних станів системи. Інші пункти списку забезпечують вибір методу розрахунку нового стану для безперервних систем. Ці методи розрізняються для змінного (Variable-step) і для фіксованого (Fixed-step) кроку часу, але ґрунтуються на єдиній методиці – розв’язку звичайних диференціальних рівнянь.

Нижче двох списків “Type”, що розкриваються знаходиться поле, назва якого змінюється в залежності від обраного способу зміни модельного часу (рекомендується залишити параметри за замовчуванням).

Параметри інших вкладок також можна використовувати за умовчанням.

Після виконання моделювання автоматично запускається “m-file” з середовища “MatLab”, який буде відповідні змодельовані перехідні процеси і статичні характеристики з урахуванням дрейфу параметрів і визначенням мінімального значення.

Таким чином, результати роботи імітаційної моделі автоматизованої

системи контролю на базі АСМ дозволили встановити залежності параметрів робочих режимів: кутової швидкості від струму на п'єзосканері (рис.5.12,а), зміни різниці потенціалів зворотного зв'язку при підведенні та відведенні поверхні до зонду в процесі підготовки до сканування (рис.5.12,б), зміни різниці потенціалів при підведенні та відведенні зонду в процесі сканування (рис.5.12,в), а також порівняти ці параметри, отримані в результаті імітаційного моделювання з експериментально отриманими даними.

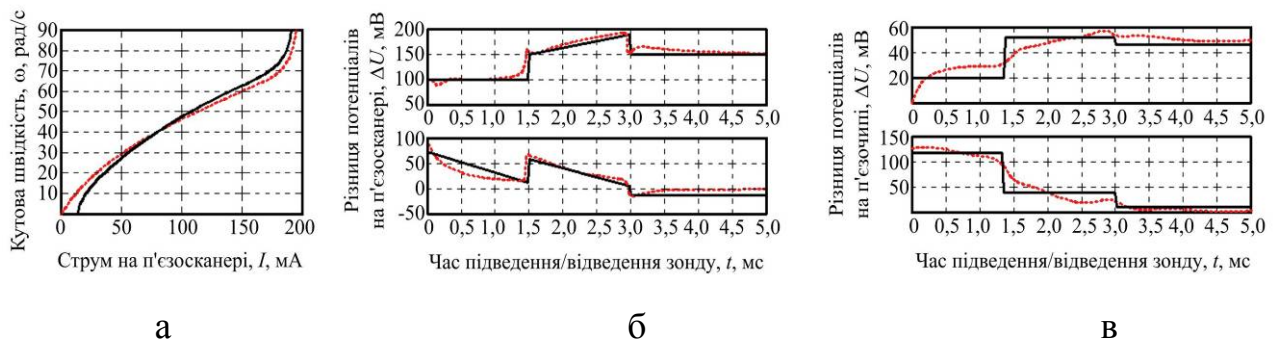


Рисунок 5.12 – Основні характеристики керування блоку контролю АСМ,

змодельовані за результатами роботи уточненої імітаційної моделі:

а – характеристика керування п'єзосканером; б – зміна різниці потенціалів зворотного зв'язку при підведенні (вгорі) та відведенні (знизу) поверхні до зонду в процесі підготовки до сканування; в – зміна різниці потенціалів при підведенні (вгорі) та відведенні (знизу) зонду в процесі сканування; суцільна лінія – дані, отримані при моделюванні системи; штрихова лінія – експериментально отримані дані

Як видно при порівнянні аналітичних та експериментальних залежностей наведених на рис.5.12 залежності мають розбіжність у 7 – 12% в порівнянні з даними, отриманими аналітично, що доводить коректність та адекватність складеної моделі.

Таким чином, розроблена та випробувана імітаційна модель автоматизованої системи контролю на базі АСМ дозволяє досліджувати її роботу, а також віртуально визначати раціональні робочі параметри системи контролю.

5.4. Розробка автоматизованої системи на базі атомно-силового мікроскопу для контролю характеристик пристроїв мікросистемної техніки

Для мінімізації впливу оператора на результати контролю, а також для проведення контролю характеристик компонентів МСТ при їх виготовленні та експлуатації з можливістю віддаленого спостереження та управління процесом експрес-контролю, в дисертаційному дослідженні пропонується автоматизувати процес контролю геометричних та механічних характеристик цих пристроїв методом АСМ (рис. 5.13).

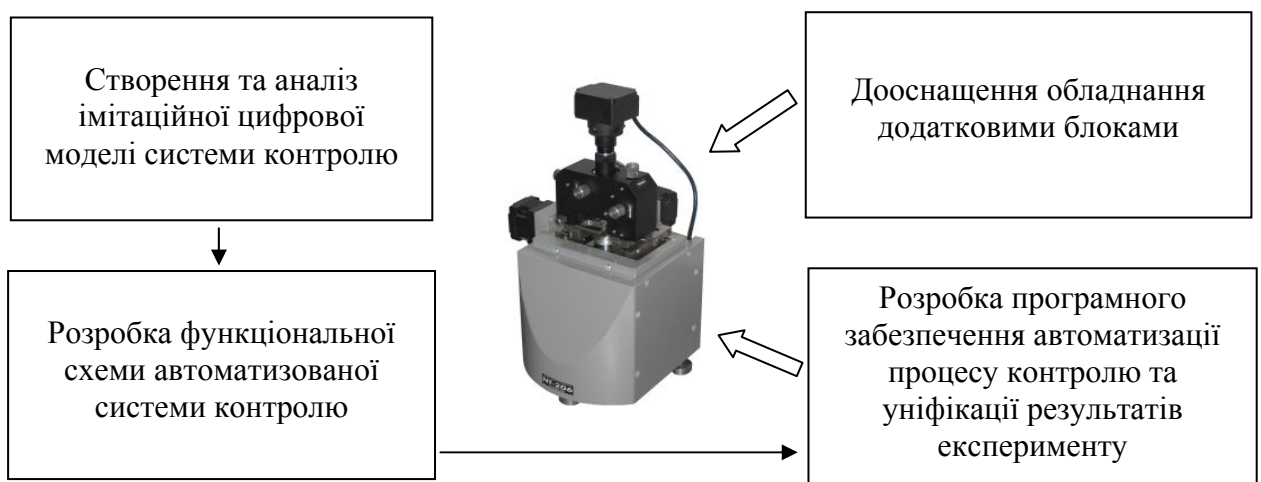


Рисунок 5.13 – Схема автоматизації обладнання для контролю методом АСМ

За схемою (рис. 5.13) пропонується провести комплексне модифікування обладнання АСМ для створення автоматизованої системи контролю геометричних та механічних характеристик пристроїв МСТ.

В результаті такого модифікування буде розроблене апаратне та програмно-математичне забезпечення автоматизованої системи контролю, що дозволить підвищити точність та надійність результатів нанометричного дослідження.

Процес автоматизованого контролю починається з встановлення та орієнтації зонду АСМ над досліджуваним зразком. Це єдиний процес, що не може бути виконаний без залучення оператора. Після позиціонування лазера проводиться перевірка інструменту за допомогою тест-об'єкту. При

невідповідності форми зонда, пристроєм видається сигнал помилки, вимагаючи від оператора замінити зонд.

Після перевірки форми зонду програма дозволяє приступати безпосередньо до процесу підведення зонду до поверхні та проведення сканування в автоматичному режимі в послідовності дій, що описана у відповідній методиці (див. п.2.2).

Подальша автоматизація процесу контролю полягала в дооснащенні обладнання АСМ додатковими блоками, а саме: системою позиціонування лазерного променя на зонд та модулем видалення залишкового трибоелектричного заряду

Впровадження системи позиціонування лазерного променя на зонд АСМ (рис. 5.14,а) [44] полягає у розміщенні еліптичного дзеркала 5 на шляху розповсюдження лазерного променя від світловипромінюючого діоду 1 до зонду 2 і далі – до багатопозиційного фотодетектору 3.

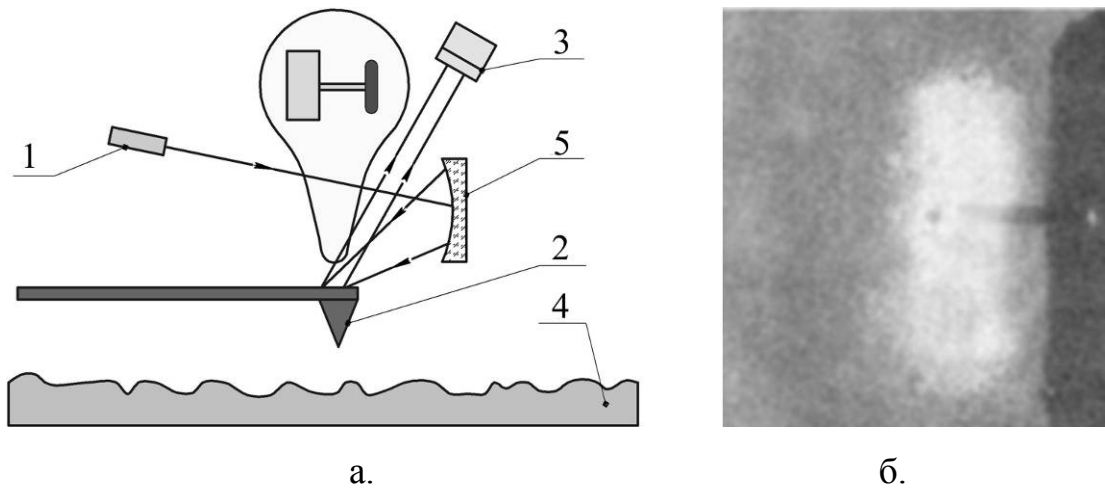


Рисунок 5.14 – Схема розробленої системи позиціонування лазерного променя на зонд АСМ (а) та фотографія (б), що демонструє роботу системи позиціонування: 1 – світловипромінюючий діод; 2 – вимірювальний зонд АСМ; 3 – багатопозиційний фотодетектор; 4 – досліджувана поверхня; 5 – еліптичне дзеркало

Автоматизація процесу наведення лазерного променя системи підведення АСМ до досліджуваної поверхні на зонд за допомогою

запропонованої системи позиціонування здійснюється наступним чином.

Лазерне випромінювання, що генерується напівпровідниковим лазером 1 із точкового перетворюється на світлову смугу однакової інтенсивності та енергетичної щільності. Це відбувається на еліптичному дзеркалі 5, яке розташоване на шляху розповсюдження цього випромінювання. Високу однорідність інтенсивності та щільності світлової смуги гарантує оксидне покриття, яке наноситься на поверхню еліптичного дзеркала методом термовакуумного осадження.

Утворена область високооднорідного лазерного випромінювання у вигляді смуги формується в площині, яка є паралельною до площини зондотримача АСМ, перекриваючи вільний край консолі з віддзеркалюючим елементом на ньому. Таким чином, незалежно від того наскільки сильно буде зміщений зонд АСМ в площині зондотримача в процесі його установки, отримується гарантоване фокусування на віддзеркалюючому елементі консолі лазерного випромінювання достатньої інтенсивності для реєстрації та відслідковування його зміщення (яке відбувається в процесі сканування поверхні зондом) фотодетектором 3.

Результати випробувань системи позиціонування лазерного променя на зонд АСМ показали (рис. 5.14, б), що додатково розташоване в модулі підведення зонду до досліджуваної поверхні еліптичне дзеркало дозволяє перетворювати точкове джерело лазерного випромінювання в однорідну по інтенсивності та енергетичній щільності смугу, яка фокусується при будь-якому розташуванні зонду відносно досліджуваної площини чим усуває необхідність перелаштовувати лазерний промінь після кожної заміни зонду.

Видалення залишкового трибоелектричного заряду [45], що виникає на діелектричній поверхні внаслідок тертя зонду АСМ при її скануванні шляхом формування в цій поверхні зони провідності в якій відбувається стікання заряду у сформованій внаслідок багатофотонної іонізації в місці контакту зонду з діелектричною поверхнею зони провідності.

Блок видалення залишкового трибоелектричного заряду вбудовується в систему підведення зонду АСМ до досліджуваної поверхні та складається з призми розділення променя та еліптичного дзеркала, рис. 5.15, і по-суті є модифікацією конструкції системи позиціонування лазерного променя на зонд АСМ, розглянутої вище.

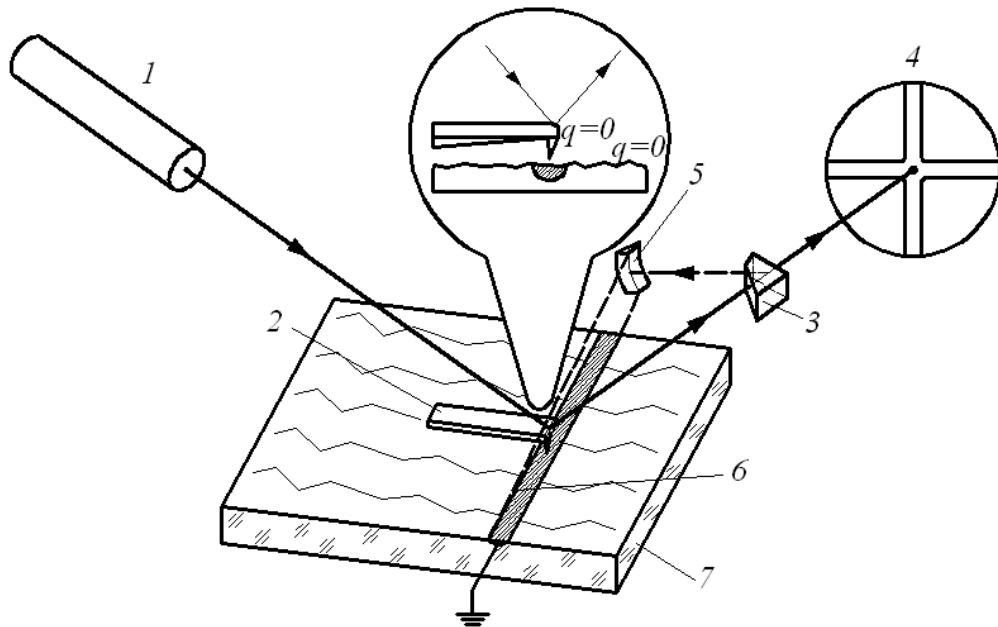


Рисунок 5.15 – Схема видалення залишкового трибоелектричного заряду із зони взаємодії між діелектричними зондом та поверхнею: 1 – світловипромінюючий діод; 2 – зонд АСМ; 3 – призма розділення; 4 – багатопозиційний фотодетектор; 5 – еліптичне дзеркало; 6 – смуга висококогерентного випромінювання, 7 – досліджувана поверхня

Спосіб працює наступним чином. Висококогерентне електромагнітне випромінювання, що генерується лазерним діодом 1 системи позиціонування зонду фокусується на мікродзеркало, яке знаходиться на кінці кремнієвого зонду 2 АСМ. Відзеркалюючись від цього дзеркала, промінь потрапляє на призму розділення 3, що розділяє лазерний промінь системи підведення на два однакових за інтенсивністю пучка, один з яких розповсюджується в тому ж напрямку – до фотодетектора відхилення кантилевера 4. Інший промінь, що заломлюється в призмі, відхиляється від прямолінійного розповсюдження і потрапляє на еліптичне дзеркало 5, призначення якого – сформувати вузьку

смугу висококогерентного випромінювання 6 вздовж усього зразка 7, що сканується, охоплюючи при цьому, як поверхню зразка, так і зонд АСМ.

В процесі сканування в статичному режимі діелектричним зондом АСМ діелектричних поверхонь, внаслідок тертя, як на поверхні вістря зонду, так і на поверхні, що сканується, утворюється електричний заряд, який виникає в процесі розділення електричних диполів в поверхні діелектрика. З кожним наступним кроком сканування відбувається накопичення електричного заряду поверхнею, що, в результаті, призводить до електростатичного розряду. Виникнення такого розряду руйнує як досліджувану поверхню, так і сам зонд, а також призводить до появи артефактів на топограмі від сканованої ділянки.

Внаслідок опромінення зарядженої поверхні досліджуваного зразка та зонду когерентним електромагнітним випромінюванням (лазером) відбувається процес багатофотонної іонізації вузької ділянки цієї поверхні, в результаті чого підвищується рухливість носіїв заряду, що призводить до їх «стікання» на заземлений елемент утримувача зразка. Тим самим накопичення електростатичного трибоелектричного заряду не відбувається, що підтверджується результатами експериментальних досліджень [45].

Неправильний вибір режиму дослідження та його параметрів оператором неминує приводить до спотворення результатів. Тому, для проведення високоточного та швидкого контролю мікрогеометрії поверхні пристроїв МСТ пропонується проводити їх перше дослідження у ручному режимі за відомими методиками по результатам яких програмно визначається та при наступних дослідженнях подібних зразків пропонується найбільш раціональний режим випробування.

Таким чином, розроблений програмний модуль дозволяє не лише автоматизувати процес контролю геометрії поверхні, але й процес контролю механічних характеристик методом АСМ. Цей програмний модуль надає можливість автоматичного дослідження (прилад проводить автоматичне підведення та відведення зонду до зразка, за графіками підведення-

відведення визначаються його модуль пружності, мікротвердість та коефіцієнт зносостійкості за прописаним алгоритмом) та напівавтоматичного дослідження (процесу автоматичного визначення вищезазначених параметрів передуює ручне введення параметрів налаштування для зразків, які раніше не досліджувалися).

5.4.1. Розробка функціональної схеми автоматизованої системи контролю

Електронний блок управління є сполучною ланкою між ПК та блоком сканування. Він містить електронні схеми, що управляють АСМ за командами ПК, а також передає дані вимірювань керуючій програмі [46], рис.5.16.

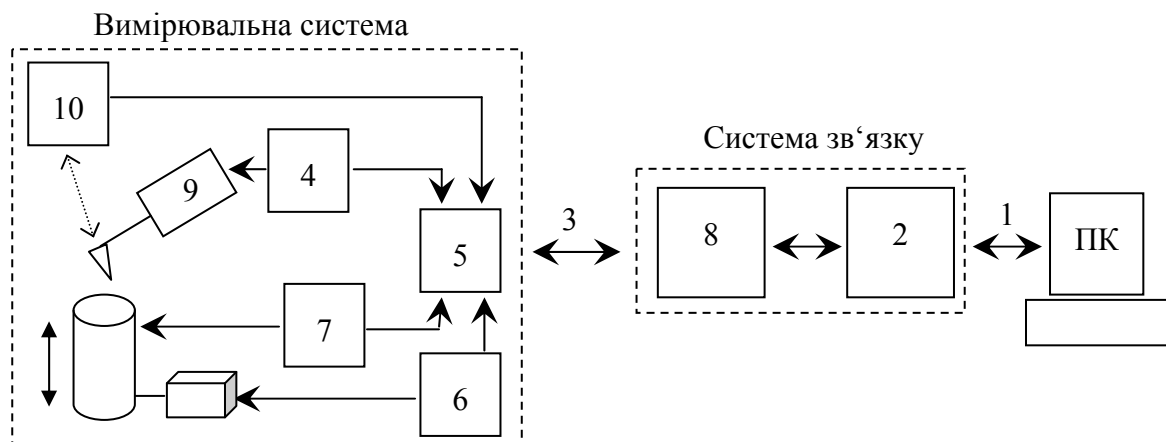


Рисунок 5.16 – Структурна схема електронного блоку управління автоматизованої системи контролю: 1 – лінія зв'язку USB; 2 – модуль зв'язку з ПК; 3 – загальна шина передачі даних; 4 – система управління зондом; 5 – система управління зворотнім зв'язком; 6 – система управління п'єзосканером; 7 – система управління кроковими електричними двигунами для жорсткого позиціонування головки контролю; 8 – внутрішній контролер керування системою контролю; 9 – п'єзочип, 10 – система фотодетектування

Електронний блок керування складається з шести функціонально

завершених модулів: модуль зв'язку з ПК (2); система управління зондом (4); система управління зворотнім зв'язком (5); система управління п'єзосканером (6); система управління кроковими електричними двигунами для жорсткого позиціонування головки контролю (7); внутрішній контролер керування системою контролю (8); п'єзочип (9) та система фотодетектування

Усі плати з описаними системами поєднуються загальною шиною передачі даних (3). Електронний блок управління функціонує наступним чином. Команди програми управління АСМ надсилаються з комп'ютера через порт USB (1) модулю зв'язку (2) електронного блока та передаються загальній шині (3), яка об'єднує усі керуючі системи блока. Загальна шина містить 8-бітну шину адреси, 16-бітну шину даних та 8-бітну шину управління.

При роботі в статичному режимі система керування зондом (4) згідно із встановленими робочими параметрами для збудження коливань п'єзочипу (9) та синхронізуючий сигнал для системи зворотного зв'язку (5).

Система зворотного зв'язку (5) аналізує сигнали з фотодетектора (10) та п'єзочипу (9) і формує сигнал, що описує напрямок та величину відхилення кантилевера зонда. У відповідності з цим сигналом відбувається формування бази виміряних даних та параметрів керування системою контролю АСМ.

Таким чином, автоматизація АСМ можлива із залученням таких магістралей: через USB-порт керування, за допомогою знімного носія, з залученням спеціалізованої системи управління.

Використання першої магістралі найбільш доступне через розповсюдженість такого виду комунікацій. Проте обмеження, що накладаються на канал USB (відносно невелика швидкість, великі інформаційні затрати та мала перешкодостійкість каналів зв'язку) не дозволяють в повній мірі використовувати цей канал для оперативного обміну інформацією.

Проблема з підключенням знімного носія в його ненадійності, а також

жорсткості алгоритму (неможливості виправити алгоритм роботи в режимі реального часу). Тому спеціалізована система управління, а саме – додатковий блок, вбудований в АСМ, дозволить керувати процесом сканування без участі оператора та дозволить вирішити проблему недостатньої гнучкості комунікацій. Функціональна схема автоматизованого комплексу наведена на рис. 5.17 [47].

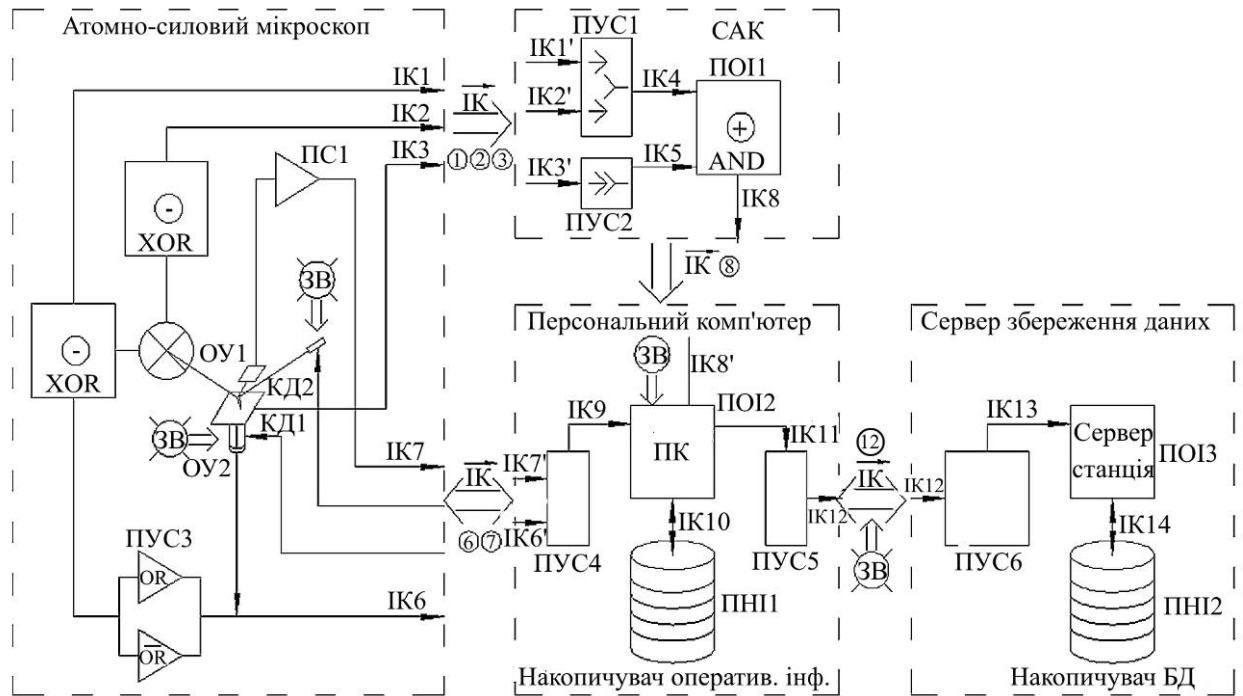


Рисунок 5.17 – Функціональна схема вдосконаленої автоматизованої системи контролю на базі АСМ: ПС – підсилювач сигналу; ІК – інформаційний канал; ОУ – об’єкт управління; ПУС – пристрій узгодження сигналів; ПОІ – пристрій обробки інформації; КД – керуюча дія на виконавчий пристрій; ПНІ – пристрій накопичення інформації; ЗВ – зовнішній вплив; \bigcirc/\bigcirc – зовнішній вплив усунено

Схема технологічного обладнання складається з чотирьох блоків, основне призначення яких наступне:

1. Атомно-силовий мікроскоп: призначений для сканування та попередньої обробки (створення масиву даних) топограми поверхні, а також її механічних характеристик. Основними вузлами даного блоку є п’єзосканер КД1, що представляє собою пристрій підведення та переміщення зразка під

зондом, обмін інформації між п'єзосканером та ПК здійснюється по інформаційному каналу ІК6, а також поступає по каналу ІК3 на пристрій діагностування. Інструмент контролю закріплений в п'єзочипі і представляє собою тонку довгу консоль з голкою нанометричних розмірів (зонду) на одному з її кінців. Під дією міжмолекулярних сил, в процесі підведення зразка до зонду та його сканування відбуваються горизонтальні та вертикальні відхилення цієї консолі від початкового положення, внаслідок чого на п'єзочипі КД2 виникає потенціал певного знаку та значення, що дозволяє визначити величину відхилення зонду по вертикалі при скануванні їм твердих поверхонь.

Отриманий сигнал з п'єзочипу попередньо підсилюється підсилювачем ПС1 і передається каналом зв'язку ІК7 на ПК. В той же час, інформація з зонду дублюється за допомогою лазерного позиціонера КД2, що генерує висококогерентний промінь, який віддзеркалюється від консолі і далі потрапляє на чотирьохпозиційний фотодетектор ОУ1. При цьому кожне відхилення консолі впливатиме на зміщення цього променя відносно фотодетектора по координатам, що, в свою чергу, дозволяє встановити відхилення консолі як у вертикальній площині, так і при її крученні навколо осі.

Отриманий сигнал про розподіл інтенсивності лазерного променя по горизонтальній та вертикальній площині поступає по інформаційним каналам ІК1 та ІК2 на систему діагностування, а також частково на блок зворотного зв'язку ПУС3. Отриманий сигнал з блоку зворотного зв'язку та сигнал, що поступає з п'єзосканера ОУ2 компаруються та передаються по каналу ІК6.

Таким чином, даний блок має сім каналів зв'язку з зовнішніми пристроями: два канали прийому (КД1, КД2) та два канали передачі (ІК6, ІК7) на ПК, а також три канали передачі на систему автоматизованого контролю (ІК1-ІК3).

2. Система автоматизованого контролю (САК) призначена для оперативного контролю та керування робочими режимами АСМ.

Складається з наступних вузлів. Вузол, призначений для узгодження сигналів, які поступають з АСМ по каналам зв'язку ІК1' та ІК2' (через пристрій узгодження ПУС1). За допомогою інформації, що передається по цим каналам блок автоматизації формує поправки до режимів сканування АСМ (час затримки, крок сканування). Через пристрій узгодження ПУС2 в свою чергу поступає сигнал з каналу зв'язку ІК3', що дозволяє блоку автоматизації в процесі роботи коригувати швидкість горизонтального сканування. Узгоджені сигнали з ПУС1 та ПУС2 потрапляють на пристрій обробки інформації ПОІ1, де вони обробляються, кодуються та передаються на ПК по каналу ІК8.

3. Керуючий ПК є основним елементом розглядуваної САК, що узгоджує роботу АСМ та блоку автоматизації, формує початкові дані процесу роботи приладу, дозволяє накопичувати, обробляти, аналізувати та зберігати отримані результати. Сигнали ІК6'-ІК8' через пристрій узгодження ПУС4 поступає до виконуючого пристрою ПОІ2, де, власне, і реалізуються усі перелічені вище функції, а також за допомогою каналу ІК10 можуть зберігатися на пристрої накопичення інформації ПНІ1.

4. Сервер збереження даних призначений для накопичення та довготривалого збереження даних. По інформаційному каналу ІК12, дані про результати сканування та налаштування режимів передаються з пристрою узгодження ПК – ПУС5 на пристрій узгодження ПУС6 на стороні серверу збереження даних. Далі, сформований масив даних, за допомогою серверної станції ПОІ3 передавався по інформаційному каналу ІК14 на віддалений ("хмарний") носій ПНІ2, де він і буде зберігатися та використовуватися з будь-якої Інтернет-адреси, що має доступ до цієї бази даних.

Основною перевагою використання запропонованої схеми є залучення до неї блоку автоматизації, що дозволяє усунути ряд зовнішніх впливів з боку оператора (ручне налагодження системи позиціонування АСМ та ручне налаштування системи фотодетектування). Це, в свою чергу, дозволить уникнути систематичних методичних похибок, чим підвищити точність,

швидкодiю та надiйнiсть результатiв контролю.

В свою чергу, система автоматизованого контролю складається з чотирьох основних блокiв, узгодження мiж якими вiдбувається по iнформацiйним каналам зв'язку USB. Так, iнформацiя про положення зразка (фактично, п'єзосканеру) та зонду (з системи фотодетектування) iз АСМ поступає на контролер системи дiагностування, де попередньо обробляється i далi подається на ПК, куди потрапляє також фактична iнформацiя з результатами сканування, та iнформацiя про стан i положення виконавчих пристроїв АСМ – п'єзосканеру, системи зворотного зв'язку тощо. Саме застосування автоматизованої системи контролю дозволяє знизити час зворотного зв'язку на 28 – 32%, чим забезпечити своєчасне коректування алгоритму та режимiв роботи АСМ, чим пiдвищити точнiсть сканування на 8,5 – 13%, швидкiсть проведення дослiдження на 35 – 40% та забезпечити високу надiйнiсть роботи приладу. Для оперативного збереження та накопичення отриманих результатiв з iх подальшим вивченням та аналiзом, ПК пiдключено до зовнiшнього сервера збереження даних, оперативний доступ до яких з будь-якого ПК можливий застосуванням, наприклад "хмарних" технологiй обмiну даними.

Реалiзацiя процесу автоматизацiї дослiдницького обладнання на базi АСМ дозволяє максимально усунути зовнiшнiй вплив на САК в процесi її роботи з боку оператора, а саме: налаштування лазера системи фотодетектування, системи попереднього пiдведення п'єзосканера до зразка та отримання залежностi «вiдстань-сила», виключити необхiднiсть органiзацiї пiдключення до зовнiшнього серверу збереження даних, а також мiнiмiзує витрати енергiї на отримання i збереження даних за рахунок прямого п'єзоефекту, що виникає в зонi контакту зонду з поверхнею [48]. За оператором залишається лише встановлення зразка на предметний столик приладу, включення автоматизованої системи та запуск спецiалiзованого програмного забезпечення.

Принцип роботи системи управлiння, що розробляється, полягає у

наступному: оператор, після попереднього налаштування приладу та встановлення зразка, завантажує розроблений програмний додаток, в якому, обравши необхідні параметри та загальний режим роботи АСМ, запускає процес сканування. Після цього, програма, в залежності від обраних параметрів роботи, формує набір команд, що передаються на блок автоматизації. Далі відбувається розшифрування прийнятих команд і формування даних для блока електроніки управління. В свою чергу, результати сканування надходять зі скануючої голівки в блок електроніки управління, де оцифровуються та накопичуються в блоці автоматизації. Після завершення процесу сканування, накопиченні дані передаються назад у ПК, де обробляються спеціалізованим програмним забезпеченням.

Саме така конфігурація системи автоматизації АСМ дозволяє суттєво пришвидшити процес обробки та передачі даних між ПК та АСМ (з 2,5 – 3 с до 1,5 – 2 с); уникнути ряду апаратних збоїв, що приводять до виникнення артефактів сканування, чим підвищити точність отриманих результатів; максимально автоматизувати роботу приладу, виключивши вплив оператора на процес сканування.

Згідно з обраною топологією, комп'ютер подає запит на сервер, сервер оброблює інформацію та повертає інформацію з АСМ. Водночас обробляється тільки один запит, тому комп'ютер який знаходиться в одній системі з сервером необхідний для адміністрування серверу та налаштування АСМ.

Оскільки це сервер, який постійно знаходиться під навантаженням, обирається конфігурація, яка зможе одночасно обслуговувати максимальну кількість користувачів, наприклад, набір стандартів бездротового зв'язку IEEE 802.11 серій (a, ac, b, g, n).

Щоб забезпечити максимальну відмовостійкість, а також максимально спростити роботу системного адміністратора, обране стандартне ПО Windows Server 2008, як операційна система для сервера.

Windows Server 2008 допомагає захищати, дані та передачу

інформації. Для робочих станцій в якості ОС було обрано Windows 7, що забезпечує запуск багатьох програм для Windows та швидко відновлює дані за допомогою автоматичних архівацій в домашній чи корпоративній мережі.

Тому, реалізація розроблюваної автоматизованої системи контролю полягала у створенні апаратно-незалежного від АСМ блоку для визначення фізичних характеристик в зоні взаємодії АСМ з поверхнями, зовнішній вигляд якого, а також його вимірювальні характеристики наведені на рис.5.18



Рисунок 5.18 – Зовнішній вигляд автоматизованої системи контролю (зліва) та блоку САК в розборі (справа)

Основним елементом системи контролю є розроблена система управління та контролю, що включає три блоки.

Блок дослідження пружних сил, визначення яких відбувається за кривою “підведення-відведення” зонду до поверхні, за характером якої робиться висновок про значення коефіцієнта пружності.

Блок дослідження капілярних сил призначений для визначення сил, що виникають між зондом та зволоженою поверхнею за залежністю “сила – відстань до поверхні”. За кривизною цієї поверхні, а також за кількістю різких спадів силової характеристики визначається капілярна сила [49].

Блок зняття трибозаряду призначений для фіксування електричного заряду, що виникає внаслідок тертя зонду о діелектричну поверхню. Приймачем в цьому блоці є електроди, які можуть бути, як у формі кільця, так і у вигляді планару – металевої сітки нанесеної методом термовакуумного осадження на випробуваний діелектрик. Вимірювані величини знаходяться в

широкому діапазоні значень, що повністю перекриває діапазон їх теоретичних (розрахункових) значень.

Така реалізація дозволяє запропонувати принципово новий підхід побудови метрологічних комплексів, що можуть складатися із обладнання рознесеного територіально, і яке може бути об'єднане спільною базою даних, покращуючи якість метрологічного процесу та оперативність обміну інформацією між вченими, що працюють в області контролю та діагностування.

5.4.2. Програмне забезпечення автоматизованої системи контролю

АСМ – це високоінтелектуальний інструмент вимірювання та контролю, розвиток якого корелює з розвитком обчислювальної техніки. Розвинуте програмне забезпечення (ПЗ) розширює дослідницькі можливості такого інструменту.

Спеціалізоване ПЗ розроблене на основі об'єктно-орієнтованих мов програмування спеціально для науково-дослідних лабораторій, які займаються науковими дослідженнями поверхонь в нанометровому діапазоні із залученням АСМ. Воно представляє собою зручний засіб для налагодження, діагностування, вибору оптимальних режимів дослідження та попередньої обробки їх результатів.

Відмінної особливостю даної програмної реалізації, в порівнянні з існуючими на сьогодні програмними продуктами є можливість автоматичного налагодження режимів роботи приладу при дослідженні певних матеріалів (які занесені до бази даних приладу). З іншого боку, навіть якщо матеріал не значиться в базі даних, оператор може самостійно уручну підібрати режими дослідження, апробувати їх на дослідних зразках та занести до бази даних з метою їх подальшого використання. Ще однією перевагою розроблюваного програмного продукту є можливість збереження

результатів налаштування приладу та результатів сканування на віддаленому сервері, що дає змогу повертатися до цих даних з будь-якого ПК, що підключене до Інтернету та використовувати їх, наприклад, при налаштуванні приладу АСМ в науково-дослідній лабораторії.

Загалом, з використанням розробленого ПЗ значно спрощується робота оператора АСМ, як на етапі його налагодження, так і на етапі проведення наукових досліджень.

Об'єктно-орієнтоване програмування (ООП) базується на моделі побудови програм як набору об'єктів абстрактного типу даних. При об'єктно-орієнтованій розробці визначаються типи, що задають об'єкти задачі. Операції в об'єктних типах, як і функції в процедурному програмуванні, представляють собою абстрактні операції, що вирішують задачі програмування. Об'єктний тип може служити модулем, який використовується для вирішення іншої задачі того ж типу. У об'єктах визначається як структура даних про об'єкт, так і операції, що можна робити над об'єктом. В якості мови ООП часто використовується така мова програмування, як “Delphi”, що представляє комбінацію декількох найважливіших сучасних технологій: високопродуктивного компілятора у машинний код, об'єктно-орієнтовану модель компонентів, візуальну побудову додатків із програмних прототипів, масштабування засобів для побудови баз даних.

Об'єкти БД у “Delphi” засновані на мові управління базами даних (SQL) і містять у собі “Borland Database Engine”. До складу “Delphi” також включений “Borland SQL Link”, тому доступ до систем управління базами даних “Oracle”, “Sybase”, “Informix” та “InterBase” відбувається з високою ефективністю.

Завдяки архітектурі компілятора додатка, виготовлені за допомогою “Delphi”, працюють надійно і стійко. “Delphi” підтримує використання вже існуючих об'єктів, включаючи динамічно приєднувані бібліотеки, написані на “C++”, “OLE”, “VBX”, об'єкти, створені за допомогою “Delphi”, тощо.

Також, “Delphi” підтримує такі низькорівневі особливості, як підкласи елементів керування Windows, перекриття циклу опрацювання повідомлень Windows, використання вмонтованого асемблера.

Виняткові ситуації, що виникають в програмі написаній на “Delphi” подаються у вигляді об'єктів, що містять специфічну інформацію про відповідну похибку (тип і місцезнаходження похибки). Розроблювач може лишити опрацювання похибки, що існувала по умовчання, або написати свій власний оброблювач.

В силу описаних переваг, в якості засобу написання ПЗ для обробки інформації з системи контролю використовується середовище розробки “Delphi”.

Структура головного меню програми.

Розділ меню «Отримання результатів»

- ☐ *Вибір параметрів.* Дозволяє обрати параметри сканування для чого надає список доступних матеріалів, їх властивостей та оптимальних режимів сканування цих матеріалів.
- ☐ *Сканування.* Дозволяє проводити сканування ділянки поверхні за допомогою АСМ за встановленими режимами.
- ☐ *Режим сканування.* Дозволяє обрати один із чотирьох доступних режимів проведення дослідження.
- ☐ *Вихід.* Використовується для закриття програми.

Розділ меню «Обробка даних»

- ☐ *Інформація про результати сканування.* Виводить основну інформацію про режими отримання та збереження даних.
- ☐ *Формат збереження даних.* Дозволяє обрати один із трьох доступних форматів в яких можуть зберігатися отримувані дані.
- ☐ *Зберегти дані.* Зберігає отримані в результаті сканування дані на диск.
- ☐ *Видалити дані.* Видаляє отримані в результаті сканування дані з диску.

Розділ меню «Обмін даними»

- ☐ *Вибір серверу.* Дозволяє обирати робочий сервер на який будуть

передаватися дані, отримані в результаті сканування.

- *Передати дані.* Передає отримані в результаті сканування дані в базу даних.
- *Отримати дані.* Залучає до роботи програми дані із бази даних.
- *Порівняти дані.* Порівнює отримані в результаті сканування дані з аналогічними даними із бази даних.

Пункт меню «Допомога»

- *Довідка.* Показує користувачу довідковий документ.
- *Про програму.* Наводиться інформацію про програму та її версію.

Інструкція по роботі з програмою допоможе користувачу освоїти роботу автоматизованої системи контролю АСМ та допоможе проводити налаштування, вибір оптимальних режимів, обрання правильного матеріалу та налагодити роботу у віддалено-дистанційному режимі (додаток Г).

Таким чином, можна зробити висновок, що перевагою структури та програмної реалізації ПЗ на базі об'єктно-орієнтованої мови “Delphi” підтримання розробленої автоматизованої системи контролю є її простота, легка адаптація під різні системи інтерпретування (“Builder”, “Java” тощо) в різних операційних системах, а також можливість подальшого розвитку цього ПЗ шляхом його адаптації до Web-технологій, що дозволить значно покращити точність та адаптованість програмного продукту до сучасних віртуальних технологій (у тому числі, “хмарних”).

5.4.3. Розрахунок та дослідження процесу обміну інформацією в автоматизованій системі контролю

Дистанційні дослідження поверхонь матеріалів за допомогою АСМ набувають широкої популярності і включають в себе обмін командами, передачу даних, документів, контроль доступності об'єкту дослідження, тощо. В свою чергу технологія дистанційної передачі даних, що розвивається

на базі мережі Інтернет є вельми надійною для роботи, як в інтерактивному режимі, так і в режимі дистанційного керування.

В якості основних критеріїв процесу обміну інформацією (трафіку) прийняті три характеристики:

- відносна передбачуваність швидкості передачі даних;
- чутливість трафіку до затримок пакетів і їх варіацій;
- чутливість трафіку до втрат і спотворень пакетів.

Передбачуваність швидкості передачі даних. У даному відношенні трафік АСМ даних можна віднести до потокового – коли відбувається обмін рівномірним потоком даних, що надходить в мережу з постійною бітовою швидкістю.

Чутливість трафіку до затримок пакетів. Система обміну інформацією в АСМ за чутливістю до затримок пакетів відноситься до трафіку даних, коли затримки при передачі трафіку цієї категорії можуть мати практично будь-які значення і досягати декількох мілісекунд. Для трафіку даних смуга пропускання більш важлива, ніж час затримок: збільшення пропускну здатності мережі тягне за собою зменшення часу передачі.

Чутливість трафіку до втрат і спотворень пакетів. До пакетів, що передаються АСМ, відносяться дані, що передаються з інформацією про виміряні фізичні величини (мікрорельєф, мікротвердість, зносостійкість тощо), коли невелика кількість відсутніх або спотворених даних можна визначити на основі тих даних, що були прийняті. Проте стійкість до втрат має свої межі, тому відсоток втрачених пакетів не може бути більше 1%.

На основі залежності працездатності системи передачі даних від затримки пакетів, системи передачі даних для АСМ відносяться до ізохронних систем. В таких системах перевищення часу затримки при передачі даних спотворює увесь пакет даних, що призводить до виникнення артефактів АСМ-зображення.

Потоки пакетів даних в мультисервісних мережах для систем АСМ. Потоки пакетів (трафік) в мультисервісних пакетних мережах зв'язку істотно

відрізняються від моделі пуассонівського потоку, що описується експоненціальною функцією розподілу інтервалу часу між моментами надходження пакетів. Потоки пакетів формуються множиною джерел запитів на надані мережею запити і мережевими додатками, що забезпечують послуги передачі АСМ-даних.

Джерела запитів, що беруть участь в процесі створення потоку пакетів, істотно відрізняються між собою значеннями питомої інтенсивності навантаження.

Інтенсивність навантаження результуючого потоку пакетів в кожен момент часу залежить від того, якими додатками обслуговуються джерела запитів і яке співвідношення їх чисельності для різних додатків. На структуру трафіку також впливають і технологічні особливості застосовуваних алгоритмів обслуговування. Пакетний трафік є різномірним, а потоки різних даних вимагають забезпечення певного рівня якості обслуговування. У цих умовах передачу потоків усіх даних забезпечує єдина мультисервісна мережа із загальними протоколами і законами управління, при тому, що різні джерела мають різні швидкості передачі інформації або змінюють її в процесі сеансу зв'язку (максимальна і середня швидкість). Через це об'єднаному потоку пакетів властива пачковість (берстність) трафіку з випадковою періодичністю і тривалістю піків навантаження.

За допомогою програма-аналізатор трафіку “Wireshark” (розробник: “The Wireshark team”) протягом 4,5 хвилин проаналізовано мережевий трафік передачі даних у розроблюваній в даному дисертаційному дослідженні системі контролю АСМ. В таблиці 5.3 представлено фрагмент виміряного мережевого трафіку.

“Wireshark” працює на основі бібліотеки “Pcap” (Packet Capture) дозволяє створювати програми аналізу мережеских даних, що надходять на мережеву карту комп'ютера. Програма також дозволяє користувачеві переглядати весь трафік, що проходить по мережі в режимі реального часу, сортувати його і фільтрувати дані.

Таблиця 5.3 – Фрагмент вимірюного мережевого трафіку

Номер пакету	Загальний розмір вимірюного трафіку, байт	Тривалість передачі даних, с	Найменування пакету даних
1	16	0,020687	AFM-Control
2	37	0,047876	AFM-Verify
3	45	0,060576	AFM-Data stream
4	48	0,069358	AFM-Data stream
5	52	0,069802	AFM-Control
.....			
25749	278506	269,370343	AFM-Control
25750	278553	269,417032	AFM-Data stream

На рис.5.19 представлено результат вимірювань параметрів трафіку пакетної мультисервісної мережі, на якому показана залежність кількості пакетів протоколу АСМ в одиницю часу на інтервалі часу 4,5 хвилини.

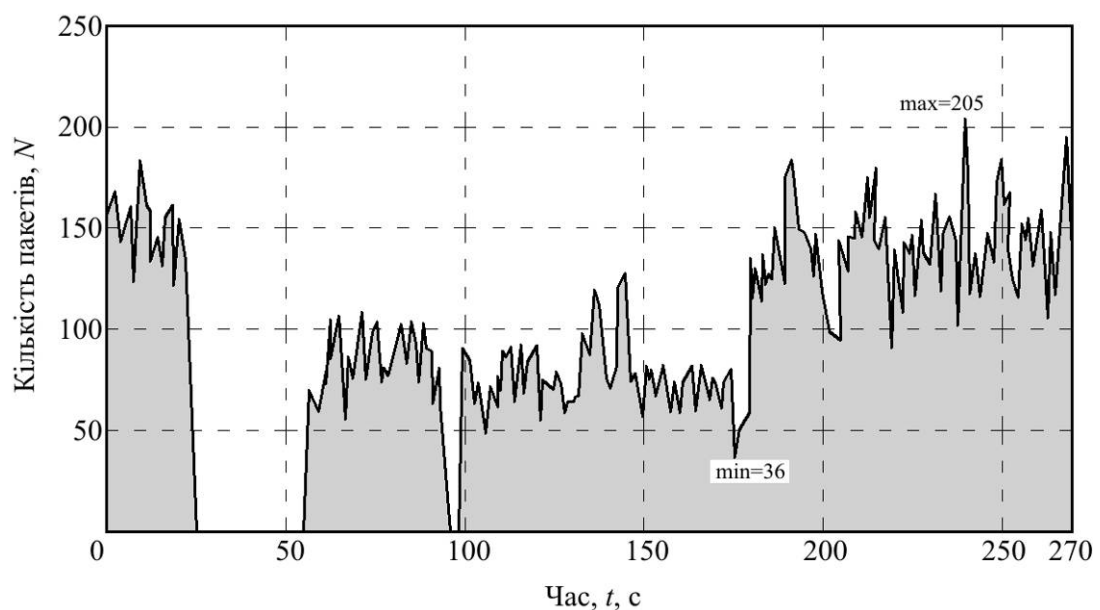


Рисунок 5.19 – Число пакетів протоколу АСМ, що відправлені системою в мережу в одиницю часу

Дані, представлені в таблиці 5.3 та на рис.5.19 доводять той факт, що для мультисервісного трафіку характерна сильна нерівномірність інтенсивності надходження пакетів (найбільший викид в пачці дорівнює

205 пакетів, найменший – 36). Всього виміряно 25750 пакетів протоколу АСМ. Пакети не плавно розосереджені по різних інтервалах часу, а групуються в пачки в певних інтервалах часу. Через це, в пачковому трафіку при порівняно невеликому середньому значенні інтенсивності надходження пакетів (інтенсивність трафіку) присутня достатня кількість відносно великих викидів. Генерування інформації в загальному випадку може бути представлено за допомогою стохастичного процесу $B(t)$.

Середня тривалість піку T_n визначає середній час безперервної передачі по піковій швидкості протягом сеансу зв'язку.

Процес передачі інформації триває протягом часу сеансу зв'язку ($T_c = 269,42$ с). Стохастичний процес передачі інформації можна охарактеризувати відповідно до рекомендацій ІТУ-Т 1.311 максимальною (піковою) бітовою швидкістю:

$$B_p = \max b(t). \quad (5.7)$$

Враховуючи дані з табл. 5.3, $B_p = 8688$ біт/с.

Середня бітова швидкість передачі інформації:

$$B_m = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} B(t) dt. \quad (5.8)$$

Тут, $B_m = 6632$ біт/с.

Співвідношення між середньою швидкістю і піковою швидкістю визначає коефіцієнт пачковості (берстність):

$$K = \frac{B_p}{B_m} = \frac{8688}{6632} = 1,31. \quad (5.9)$$

Автором дисертаційного дослідження проводилася атестація мережевого каналу розроблюваної системи контролю АСМ. Для цього проводилося 11 вимірювань швидкодії каналу, які, відповідно, мали значення: 17,9 мс, 20,5 мс, 18,3 мс, 17,2 мс, 14,0 мс, 18,9 мс, 18,3 мс, 19,8 мс, 19,6 мс, 17,8 мс, 22,1 мс. Нормативне значення швидкодії: $\tau_0 = 16$ мс. Довірча ймовірність вимірювань приймали такою, що дорівнює $P = 0,95$.

На основі гіпотези: $H_0: \bar{x} = \tau_0$; $H_0: \bar{x} > \tau_0$,

критерій якої мав вигляд:
$$\hat{T} = \frac{\bar{x} - \tau_0}{\frac{S_n}{\sqrt{n}}},$$

проводилися розрахунки для $n = 11$ вимірювань:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i,$$

що дозволив встановити наступне:

$$\bar{x} = \frac{1}{11} \cdot (17,9 + 20,5 + 18,3 + 17,2 + 14 + 18,9 + 18,3 + 19,8 + 19,6 + 17,8 + 22,1) = 18,582$$

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{11-1} \cdot 42,724} = 2,067;$$

$$\hat{T} = \frac{18,58 - 16}{\frac{2,067}{\sqrt{11}}} = 2,14.$$

В даному випадку обиралася одностороння критична область $K: |t| \geq \varepsilon$.

По таблиці розподілу Стюдента, зі співвідношення $P\{|\hat{T}| < \varepsilon\} = 1 - \alpha$

визначимо ε .

При ймовірності $P = 0,95$ та числу ступенів свободи $k = n - 1 = 10$, отримаємо значення $\varepsilon = 2,228$.

Оскільки $\hat{T} < \varepsilon$ ($2,14 < 2,228$), то гіпотеза H_0 приймається, тобто вимірне значення швидкодії трафіку менше нормативного, що підтверджує працездатність автоматизованої системи контролю АСМ.

Дослідження мережевого трафіку.

Експериментальні дослідження та аналіз численних вимірів інформаційних потоків на пакетному рівні вказують на специфічну природу процесів в мережах передачі АСМ-даних, які не відносяться до традиційних рамок відомих випадкових моделей. Характерним для опису процесів передачі даних пакетним трафіком є виявлені на практиці властивості самоподібності або масштабної інваріантності статистичних характеристик.

Ці властивості пов'язують з особливим класом фізичних процесів – фрактальними процесами.

Аналіз фрактальних властивостей часових рядів є одним з перспективних напрямків аналізу даних. Обсяги повідомлень в інформаційних потоках утворюють тимчасові ряди. Часовий ряд (лаг) – розрив у часі між двома або кількома подіями, які перебувають в причинно-наслідкового зв'язку.

Оцінка статистичних характеристик мережевого трафіку. Для оцінки статистичних характеристик розподілу пакетів АСМ-даних, розраховуються інтервали між надходженнями пакетів. У таблиці 5.4 представлені дані розрахункових інтервалів між пакетами.

Таблиця 5.4 – Інтервали між пакетами АСМ-даних

Номер пакету	Інтервал, мс	Номер пакету	Інтервал, мс	Номер пакету	Інтервал, мс	Номер пакету	Інтервал, мс
1	27,189	6	8,155	11	16,522	16	2,534
2	12,7	7	0,518	12	18,248	17	1,72
3	8,782	8	1,67	13	13,483	18	31,059
4	0,444	9	22,147	14	11,22	19	2,476
5	17,953	10	13,131	15	10,419	20	14,141

Дослідження інтервалів пакетів АСМ-даних підтверджує властивість їх самоподібності (масштабної інваріантності), що підтверджує можливість подальшого вивчення питання передачі та обробки даних із залученням фрактальних алгоритмів і не входить до задач, розглядуваних в даному науковому дослідженні.

Таким чином, автоматизація АСМ шляхом розроблення апаратного та програмно-математичного забезпечення для контролю компонентів МСТ, а саме: створення та аналіз імітаційної цифрової моделі системи контролю з метою визначення її раціональних робочих параметрів, розробка програмного забезпечення для автоматизації процесу контролю та уніфікації

результатів експерименту, а також дооснащення обладнання додатковими блоками (системою позиціонування лазерного променя на зонд, модулем видалення залишкового трибоелектричного заряду), мінімізують вплив оператора на отримувані результати та дозволяють проводити вимірювання та контроль геометричних та механічних характеристик поверхонь компонентів МСТ при їх виготовленні та експлуатації з можливістю віддаленого спостереження та управління процесом контролю, чим значно підвищується його точність та надійність.

5.4.4. Похибки визначення геометричних та механічних характеристик автоматизованою системою контролю

Підвищення точності результатів контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ автоматизованою системою контролю на базі АСМ підтверджується шляхом визначення сумарної похибки визначення цих характеристик. Для цього автором встановлені причини виникнення та походження окремих складових цієї похибки, а також проведені їх чисельні розрахунки (Додаток Д).

Так, в результаті проведених обрахунків [44], [50] – [53] було розраховане значення загальної похибки для ідеалізованого випадку проведення контролю геометричних та механічних характеристик поверхні методом АСМ становило $\delta_{\Sigma} = 2,7\% < 5,5\%$, чим дотримувалися умов стандарту ISO/IEC 17025:2005.

Таким чином доведено, що удосконалення інструментальної та апаратно-методичної бази забезпечує підвищення точності контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ, чим дотримуються вимоги, які висуваються до цих пристроїв системою міжнародних стандартів.

5.5. Віртуальна лабораторія нанометричних випробувань

Перспектива створення віртуальних лабораторій нанометричних випробувань підтверджується на прикладі роботи віртуальної лабораторії атомно-силової мікроскопії та нанометричних досліджень, створеної на базі навчально-наукового Центру «Мікронанотехнології і обладнання» (ННЦ МНТО), організованого при кафедрі фізики Черкаського державного технологічного університету (ЧДТУ), що дозволяє забезпечити інтерактивний зв'язок між існуючим наукоємним обладнанням, а також інтегруватись з існуючими віртуальними метрологічними лабораторіями для створення загальної бази накопичених знань (на віртуальному рівні).

Існуючі сьогодні нечисленні віртуальні лабораторії обмежені в своїх функціях і представляють, у більшості випадків, віртуальні лабораторні роботи, демонстраційні матеріали або віртуальні прилади [54], [55].

Проте, сучасна віртуальна лабораторія, повинна представляти комплекс реальних приладів і методик для забезпечення повноцінного дослідження в рамках поставлених завдань.

Розроблена в ЧДТУ спільно з фахівцями з кафедри інформаційних технологій і систем Чорноморського державного університету ім.П.Могили віртуальна лабораторія (ВЛ) атомно-силової мікроскопії та нанометричних досліджень відноситься до нового покоління гібридних систем накопичення, аналізу та подання знань, яка об'єднує в собі процедурну і декларативну моделі систем штучного інтелекту [56].

Функціональна та структурна схема віртуальної лабораторії нанометричних випробувань. Реалізація віртуальної лабораторії нанометричних випробувань (ВЛНВ) дозволяє запропонувати принципово новий підхід до побудови вимірювальних комплексів та автоматизованих систем контролю, які складаються із обладнання рознесеного територіально, але при цьому об'єднаних спільною базою даних. Це дозволяє якісно покращити, як процеси вимірювання і контролю, так і оперативність обміну

інформацією між вченими, що працюють в області дослідження та контролю виготовлення пристроїв МСТ.

Таким чином, автоматизація процесу контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ, зведення безпосереднього фізичного втручання в роботу приладу з боку оператора до мінімуму та застосування зовнішньої бази накопичення знань, дозволили створити колективом фахівців на чолі з автором дисертаційного дослідження віртуальну лабораторію нанометричних випробувань, структура якої представлена на рис.5.20.

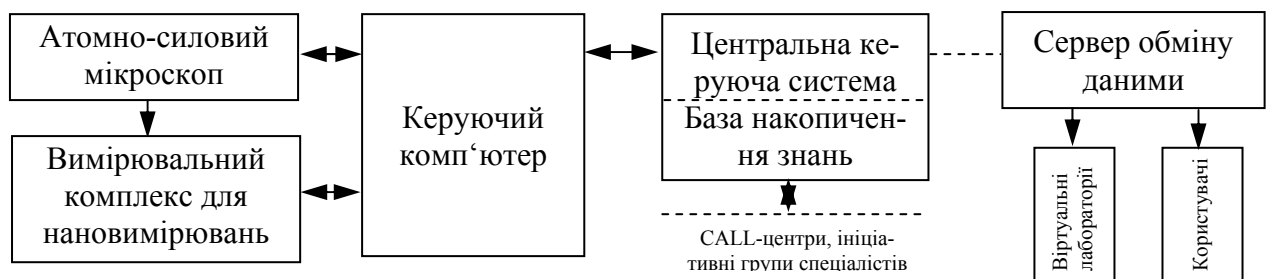


Рисунок 5.20 – Структура віртуальної лабораторії нанометричних випробувань

До організації ВЛНВ в ННЦ «МНТО» застосовувався комплексний підхід, коли отримання, навчання і накопичення знань забезпечувалося на всіх етапах дослідного процесу (рис.5.21).

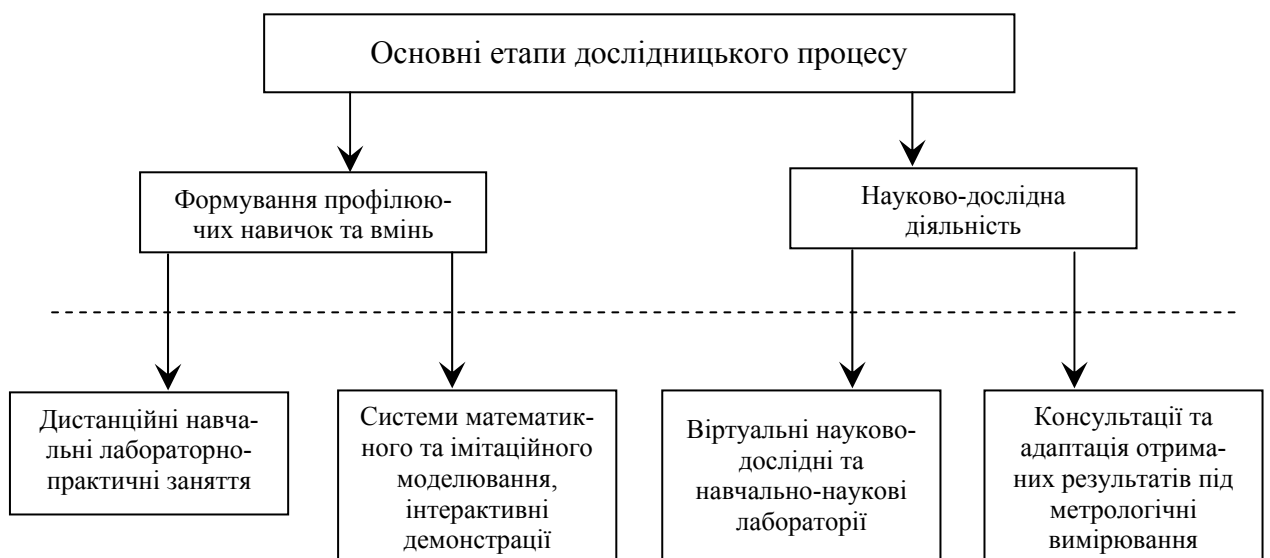


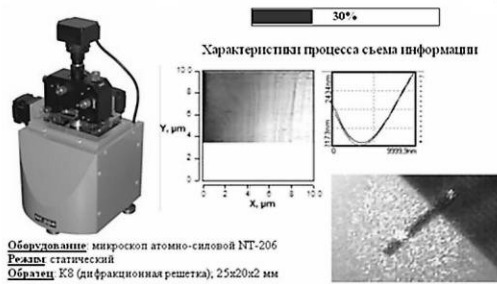
Рисунок 5.21 – Основні етапи дослідження процесів, що здійснюються у віртуальній лабораторії нанометричних випробувань

Розроблена віртуальна лабораторія пройшла успішне випробування на базі лабораторії «Атомно-силової мікроскопії та нанометричних досліджень» ЧДТУ [57]. Основною метою використання ВЛНВ є забезпечення інтерактивного зв'язку між існуючим обладнанням і користувачем, який дистанційно віддалений, а також інтеграція існуючих віртуальних лабораторій для створення загальної бази накопичених знань. Основні завдання, які вирішуються в рамках віртуальної лабораторії полягають в оптимізації робочого часу та розвантаженні реальних навчально-дослідних лабораторій; накопичені набутих знань у загальній базі даних, яка легко адаптується під різні бази даних та системи обробки результатів дослідження; підвищення активності навчальної та дослідницької діяльності.

Використання автоматизованої системи, окрім вищезгаданих переваг, також дозволяє розширити функціональні можливості методу АСМ, а саме: визначати товщину, механічні та електрофізичні характеристики тонких покриттів та поверхневого шару, визначати електрофізичні характеристики компонентів МСТ.

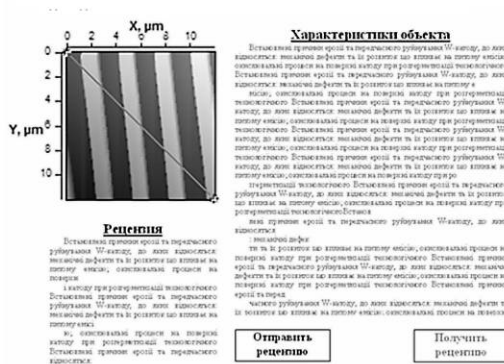
Тестування роботи віртуальної лабораторії. На початковому етапі створення бази даних накопичених знань ВЛНВ відбувається отримання первинної інформації за допомогою спеціально створеного програмного забезпечення на ПК користувача (рис.5.22).

Наступний етап – це обробка первинної інформації в залежності від завдань, які ставляться користувачем ВЛНВ. Цей етап включає: роботу з файлами (збереження, експортування та імпортування даних на зовнішній носій); обробку даних (кадрування, 3D-метрію, математичну обробку); дослідження отриманих результатів (профілограм, топограм та іншого); пошук-адаптацію отриманих даних (підключення до інших баз даних віртуальних лабораторій; пошук схожих структур; робота з CALL-центром, інтерактивні консультації).

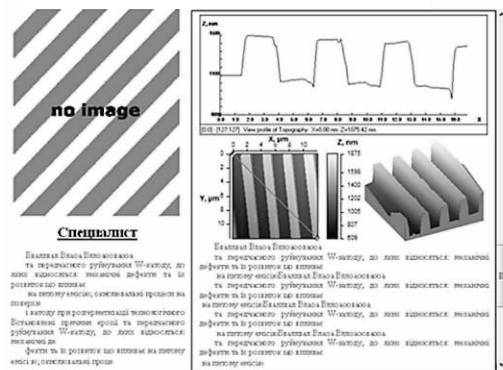


а.

б.



в.



г.

Рисунок 5.22 – Реалізація ВЛНВ на різних етапах її роботи (інтерфейс на ПК користувача в процесі роботи ВЛНВ): а – етап отримання первинної інформації; б – етап обробки первинної інформації та роботи з CALL-центрами; в – етап збереження обробленої інформації в особисту базу даних; г – етап інтерактивної консультації

На етапі збереження обробленої інформації (рис.5.22, в) відбувається накопичення та передача інформації, отриманої та обробленої, безпосередньо, системою контролю, а саме: карт розподілу мікронерівностей, топології, коефіцієнтів тертя, даних про середню мікротвердість, зносостійкість, адгезійну міцність та інше на електронний носій або зовнішню базу даних користувача.

В роботі віртуальної лабораторії нанометричних випробувань також

передбачена можливість інтерактивної консультації (рис.5.22, г), коли користувач (оператор ВЛНВ) може залучити до аналізу та опису отриманих в результаті експериментальних вимірювань даних інших користувачів, професіональних вчених та фахівців з інших віртуальних лабораторій, що спеціалізуються в області нанометричного контролю.

Разом з фахівцями із Черкаського державного технологічного університету (ЧДТУ) та із Чорноморського державного університету ім.П.Могили досліджувалася робота ВЛНВ, що була створена на базі лабораторії “Атомно-силової мікроскопії та нанометричних досліджень” (ЧДТУ). Дослідження роботи такої ВЛНВ полягало у онлайн зверненні до АСМ з різних Інтернет-адрес (одночасно зверталися до ВЛНВ від 3 до 8 абонентів). В результаті проведених досліджень встановлено, що робота ВЛНВ при одночасному Інтернет-зверненні до неї 3 – 5 абонентів є високостабільною. Затримки у скануванні не перевершують гранично встановлених значень і максимально становлять 5,4 мс. В той же час, при збільшенні числа абонентів до восьми, затримки у скануванні становлять 10,13 мс. Зменшення затримки сканування передбачається у збільшенні каналів звернення до АСМ, а також у організації паралельного звернення до неї. Також розроблена ВЛНВ показала можливість автоматичного обрання найбільш раціонального режиму сканування різних матеріалів. Так, початково установлені параметри режиму сканування для кремнію марки Кр0 при першому скануванні та параметри скореговані програмним забезпеченням ВЛНВ при п'ятому скануванні мали розбіжність, що не перевищує 3 – 5%.

Таким чином, обґрунтована необхідність створення віртуальної лабораторії нанометричних випробувань і доведена доцільність створення такої лабораторії для проведення навчальних та науково-дослідницьких робіт в наукових та освітніх установах і організаціях. Також показаний результат роботи такої лабораторії, створеної в навчально-науковому центрі «Мікронанотехнології та обладнання».

5.6. Висновки до розділу

В розділі сформульовані основні вимоги до конструкції автоматизованих систем контролю на базі АСМ, на основі яких запропоновано нові принципи побудови таких систем контролю на базі АСМ, які містять удосконалений блок контролю в частині впровадження системи позиціонування лазерного променя на зонд АСМ та системи видалення залишкового трибоелектричного заряду, що захищені патентами України на корисну модель (№91425, №91523).

Вперше запропоновано та науково обгрунтовано новий метод підвищення точності, чутливості та відтворюваності процесу неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ на основі розробленого інструментального та програмно-апаратного забезпечення для автоматизації проведення контролю з урахування дії дестабілізуючих факторів. Це дозволило проводити високоточний (похибка $\epsilon = 2,7 - 5,4\%$, зміна чутливості $\delta S = 0,2 - 0,5$ нм, відтворюваність $Conv \leq 5\%$) та надійний (ймовірність безвідмовної роботи зондів, $P_A = 0,95 - 0,98$) контроль характеристик об'єктів дослідження, гнучко керувати робочими параметрами процесу контролю, дозволяє звести до мінімуму вплив людського фактору, здійснювати віддалене управління та спостереження за процесом контролю, виключити суб'єктивні фактори прийняття рішень, підвищити швидкодію проведення контролю та розширити межі досліджуваної ділянки (у вертикальній площині з $2 - 3$ мкм до $4,5 - 6$ мкм) з одночасним збільшенням її деталізації.

Показано, що розроблена автоматизована система контролю дозволяє уніфікувати інформацію про мікрогеометрію та механічні характеристики об'єктів визначення для її обміну з іншими інформаційно-аналітичними системами (Gwiddon, AFM-Explorer тощо), а також автоматизувати процес проведення контролю, чим значно збільшується швидкодія обробки експериментальних даних на $8 - 13\%$, компактність їх збереження у $2,2 - 3$ рази, а також збільшується механічна (в тому числі акустична і вібраційна) та теплова стабільності процесу проведення контролю.

Список використаних джерел:

1. В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, О. В. Верцанова, Ю. Ю. Бондаренко, С. О. Білокінь, та М. О. Бондаренко, *Мікроскопія в нанотехнологіях*. Київ, Україна: НТУУ “КПІ”, 2014.
2. А. Л. Толстихина "Перспективы воздушной АСМ как метода нанодиагностики на примере специализированного метрологического комплекса", на *XIV Междунар. симп. Нанофизика и нанoeлектроника*, Нижний Новгород, 2010, с. 257.
3. Настольный сканирующий электронный микроскоп. [Online]. Available: http://www.melytec.ru/production/microscope/electron/phenom_160304_preview.pdf. Accessed on: June 17, 2013.
4. В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, Ю. Ю. Бондаренко, П. В. Петльованій, С. О. Білокінь, та М. О. Бондаренко, *Методи та засоби мікроскопії*. Київ, Україна: НТУУ “КПІ”, 2013.
5. P. Rangsten, “Microstructure technology in silicon, quartz and diamond”, Ph.D. dissertation, Fac.of science a. Technology, Acta Univ. Upsaliensis. Comprehensive summ.of Uppsala, Uppsala, Sweden, 1999.
6. М. П. Рудь, В. П. Бойко, Г. В. Канашевич, Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко и др. "Визначення розподілу густини струму стрічкового електронного потоку при обробці оптичних матеріалів", на *V Міжнар. наук.-практ. конф. Динаміка наукових досліджень – '2006*, Дніпропетровськ, 2006, Т. 7, с. 45-47.
7. I. Yatsenko et. al., “Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making“, in *Proc. Int. scien.-tech. conf. Innovations in ingeneering*, Burgas, Bulgaria, 2015, Vol. 20/183, pp. 64-66.
8. V. S. Antonyuk et. al., “Formation of Wear-Resistant Coatings on Silicon Probes for Atomic Force Microscopy by Thermal Vacuum Evaporation”, *Journal of superhard materials*, Vol.37, iss. 2. pp. 112-119, 2015.

9. A. G. Hansen, "In Situ Scanning Tunneling Microscopy and Microcantilever Investigations of yeast cytochrome c on gold", Ph.D. dissertation, Dept. of Chemistry, Technical University, Denmark, Germany, 2002.
10. N. V. Lavrik et. al., "Gold nano-structured for transduction of biomolecular interactions into micrometer scale movements", *Biomedical Microdevices*, Vol. 3, iss. 1, pp. 35-44, 2001.
11. M. A. Bondarenko, V. A. Vaschenko, Yu. I. Kovalenko, I. V. Yacenko et. al. "Influence of modes of ultrasonic cleaning of the piezoelectric elements on quality of the silver electrodes formed on surfaces", на *XII Міжнар. наук.-техн. конф. Прогресивна техніка та технологія – 2011*, Київ, 2011, с. 103-104.
12. Автоматическая система сварки пластин EVG540б 2016, 12 мая 2016. [Online]. Available: <https://ostec-micro.ru/catalog/equipment/fotolitografiya-i-svarka-plastin2/evg540-avtomaticheskaya-sistema-svarki-plastin/>. Accessed on: May 12, 2016.
13. M. Fotino, "Tip sharpening by normal and reverse electrochemical etching", *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 64 (1), p. 159-167, 2001.
14. M. Fotino, "Nanotips by reverse electrochemical etching", *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 60 (23), pp. 2935-2937, 1992.
15. M. Bondarenko et. al., "Peculiarities of metalized surfaces modification of silicon elements of microelectromechanical systems with low-power electronic flow", *Materials science. Non-equilibrium phase transformations*, Year III, iss. 2, pp. 53-55, June 2017.
16. С. А. Билоконь, О. В. Свиридова, В. С. Антонюк, М. А. Бондаренко и др., "Повышение точности и срока эксплуатации зондов для атомно-силовой микроскопии". *Наноинженерия*, №1 (19), с. 10-13, 2013.
17. В. С. Антонюк, М. О. Бондаренко, та Ю. Ю. Бондаренко, "Дослідження тонких зносостійких вуглецевих покриттів і структур сформованих термічним випаровуванням у вакуумі на п'єзокерамічних матеріалах", *Сверхтвердые материалы*, №4 (198), с. 45-55, 2012.

18. В. С. Антонюк, С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко та ін., "Формування зносостійких покриттів на кремнієвих зондах для атомно-силової мікроскопії термовакuumним випаровуванням", *Сверхтвердые материалы*, №2, с. 60-69, 2015.
19. В. А. Ващенко, М. О. Бондаренко та ін. "Технологічні основи отримання металізованих покриттів на виробх мікрооптики та наноелектроніки електронно-променевим методом", Черкаський держ. технол. ун-т, Черкаси, Д/б № 0103U003689, 2004.
20. Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко, та Ю. Ю. Бондаренко, "Вплив режимів ультразвукового очищення п'єзоелектричних елементів на якість сформованих на їхніх поверхнях срібних електродів", *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут"*. Серія: машинобудування, №64, с. 87-90, 2012.
21. М. О. Бондаренко, Г. В. Канаšевич, та В. П. Бойко, "Методика розрахунку дротяного вольфрамового катоду електронної гармати Пірса", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, №1, с. 113-116, 2008.
22. М. А. Bondarenko, G. V. Kanashevich, H. V. Vertsanova, and A. V. Kotlyar, "Study of forming terms thin diamond similar nanostructures thermal vacuum-depositing", *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, спецвипуск, с. 114-116, 2009.
23. М. О. Бондаренко, "Дослідження впливу низькоенергетичного електронного потоку на мікрогеометрію поверхонь п'єзокерамічних елементів", *Науч. и призм.-практ. сборн. по техн. и естеств. наукам*, Вып. 2(32), с. 149–153, 2009.
24. В. С. Антонюк, А. В. Котляр, П. В. Петлеваний, и М. А. Бондаренко, "Особенности формирования переходной зоны "электрод-основа" в пьезокерамических изделиях термовакuumным методом", на *XI междунар. науч.-техн. конф. Инженерия поверхности и реновация изделий*, Киев, 2011, с. 28-32.

25. М. О. Бондаренко, Н. І. Божко, О. В. Котляр, та П. І. Куриленко, "Вимірювання товщини тонких композиційних покриттів в процесі їхнього осадження у вакуумі", на *VIII міжнар. наук.-техн. конф. Приладобудування – 2009: стан і перспективи*, Київ, 2009. с. 188-189.
26. С. А. Билоконь, и М. А. Бондаренко, "Повышение химической стойкости зондов атомно-силовых микроскопов к влиянию биологически активных сред", на *X міжнар. наук.-техн. конф. Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів*, Кременчук, 2011, с. 60-61.
27. М. О. Бондаренко, В. А. Ващенко, С. О. Білокінь, Ю. Ю. Бондаренко и др., "Вивчення умов утворення наноструктур на поверхнях п'єзоелектричних керамік під дією стрічкового електронного потоку", *Вісник Східноукраїнського національного ун-ту ім.В.Даля*, №8 (162), Частина 2, с. 30-34, 2011.
28. V. S. Antonyuk et. al., "Studies of thin wear-resistant carbon coatings and structures formed by thermal evaporation in a vacuum on piezoceramic materials", *Journal of superhard materials*, Vol. 34, iss. 4, pp. 248-255, 2012.
29. В. С. Антонюк, Ю. І. Коваленко, Ю. Ю. Бондаренко, та М. О. Бондаренко, "Підвищення мікротвердості та зносостійкості поверхонь елементів виробів з оптичного скла мікрообробкою електронним потоком у вакуумі", *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №1 (72), с. 3-8, 2015.
30. М. А. Бондаренко, С. А. Шелестовская, А. В. Котляр, Ю. Ю. Бондаренко и др., "Исследование кремниевых зондов атомно-силовых микроскопов, восстановленных комбинированным термовакуумным методом", на *XVII Рос. симпоз. Растровая электронная микроскопия и аналитические методы исследования твёрдых тел РЭМ-2011*, Черногловка, 2011, с. 78-79
31. М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, и О. В. Свиридова, "Исследование поверхности кремния после микрообработки низкоэнергетическим ленточным электронным потоком", на *XIX Рос. симпоз. Растровая*

электронная микроскопия и аналит. методы исследования твердых тел, Черноголовка, 2015, с. 10-11.

32. М.А. Bondarenko, "Research of influence of the state of surface of probes for AFM on exactness and quality of the topograms", in *Proc. XXXI Int. scien. conf. Electronics and nanotechnology (ELNANO 2011)*, Kyiv, 2015, pp.60.
33. М. О. Бондаренко, та Ю. Ю. Бондаренко, "Дослідження впливу соляних розчинів на металеві поверхні оптичних елементів", на *IV міжнар. наук.-практ. конф. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016)*, Чернігів, 2016, с. 247.
34. М. О. Бондаренко, "Вплив умов біоактивного середовища на стан поверхні перспективних матеріалів", на *XV Міжнар. наук.-техн. конф. Приладобудування: стан і перспективи*, Київ, 2016, с.169-170.
35. М. О. Бондаренко, В. А. Ващенко, С. О. Шелестовська, Ю. Ю. Бондаренко и др., "Умови створення нанорозмірних поверхневих структур на п'єзоелектричних кераміках електронно-променевим методом", на *IV Всеукр. наук.-практ. конф. Актуальні проблеми прикладної фізики АППФ-2011*, Севастополь, 2011, с. 49-53.
36. М. О. Бондаренко, В. А. Ващенко, Ю. Ю. Бондаренко, та И. В. Яценко, "Формирование упорядоченных наноструктур на пьезоэлектрической керамике системы ЦТС термическим осаждением в вакууме", на *X междунар. Пром. конф. Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях*, Київ, 2010, с. 159-160.
37. С. С. Голубев, и С. Н. Голубев, "Методы и средства метрологического обеспечения измерений с помощью сканирующей зондовой микроскопии", на *X Междунар. конф. Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии*, Минск, РБ, 2010, с. 338-343.
38. ДСТУ ГОСТ 8.593:2014, Метрологія. Мікроскопи сканувальні зондові атомно-силові. Методика перевірки.

39. ДСТУ-Н РМГ 53:2014 Метрологія. Стандартні зразки. Оцінювання метрологічних характеристик з використанням еталонів і зразкових засобів вимірювання.
40. ДСТУ ГОСТ 8.591:2014, Метрологія. Міри рельєфні нанометрового діапазону з трапецієподібним профілем елементів. Методика повірки.
41. Ю. А. Новиков, Ю. В. Озерин, Ю. И. Плотников, А. В. Раков и др., "Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазонов для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии", *Труды института общей физики им. А.М. Прохорова*, Т. 62, с. 36-59, 2006.
42. ДСТУ ГОСТ 8.592:2014, Метрологія. Міри рельєфні нанометрового діапазону з монокристалічного кремнію. Вимоги щодо геометричних форм, лінійних розмірів та виробу матеріалу для виготовлення.
43. І. В. Дробот, Т. Ю. Уткіна, М. П. Рудь, та М. О. Бондаренко, "Автоматизована система моделювання процесу електронної обробки оптичних матеріалів", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: технічні науки*, №3, с. 38-41, 2006.
44. С. О. Білокінь, В. С. Антонюк, Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко та ін., "Система позиціонування лазерного променя на зонд атомно-силового мікроскопу", *МПК (2006.01) G01B 11/03. №91523*, Січ. 20, 2014.
45. С. О. Білокінь, В. С. Антонюк, М. О. Бондаренко, та Ю. Ю. Бондаренко, "Спосіб видалення залишкового трибоелектричного заряду", *МПК (2014.01) H05F 3/00. №91425*, Лип. 10, 2014.
46. С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко, та В. С. Антонюк, "Автоматизація досліджень за допомогою атомно-силового мікроскопу", на *XVI Междунар. науч.-практ. конф. Качество, стандартизация, контроль: теория и практика*, Киев, с. 214-216, 2016.
47. М. О. Бондаренко, та Ю. Ю. Бондаренко, "Автоматизований комплекс для нанометричних досліджень", на *наук.-техн. конф. Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ-2016)*, Суми, с. 200, 2016.

48. M. Bondarenko, and I. Bondarenko, "Power supply method of micro- and nanosystem engineering devices", in *Proc. 6th International Symposium Energy Challenges & Mechanics*, Inverness, UK: Scotland, pp. 245-246, 2016.
49. С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко, та В. С. Антонюк, "Керування змочуваністю зондів атомно-силового мікроскопу для біологічних досліджень", на *XIII міжнар. наук.-техн. конф. Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів*, Кременчук, с. 89-90, 2014.
50. В.С. Антонюк, та М.О. Бондаренко, "Підвищення точності базування виробів із п'єзоелектричних керамік при електронно-променевої модифікації їх поверхонь", *Вісті Академії інженерних наук України*, №2 (42), с. 26-29, 2011.
51. Mikromasch HQ line product screencast on HQ:CSC37 & HQ:CSC38 probe series, 2016. [Online]. Available: <https://www.spmtips.com /afm-tip-hq-csc38-no-al>. Accessed on: May 12, 2016.
52. DataSheet Archive. SFH244S, 2016. [Online]. Available: <http://www.datasheetarchive.kr /SFH244S-datasheet.html>. Accessed on: May 12, 2016.
53. Є.С. Поліщук та ін., *Метрологія та вимірювальна техніка*. Львів, Україна: Вид-во "Бескид Біт", 2003.
54. Виртуальная образовательная лаборатория VirtuLab [Online]. Available: <http://www.virtulab.net/>. Accessed on: April 15, 2010.
55. Соловов А. В., "Виртуальные учебные лаборатории в инженерном образовании", *Индустрия образования*, Выпуск 2, с. 386-392, 2002.
56. М. А. Бондаренко, В. А. Андриенко, С. А. Билоконь, и др., "Создание виртуальной лаборатории атомно-силовой микроскопии в технологическом университете", на *XXIV Рос. конф. Электронная микроскопия*, Черноголовка, с. 210-211, 2012.
57. М. А. Bondarenko, "Necessity of creation of virtual laboratory of physical research of materials", in *Proc. Intern. conf. of science and technology System analysis and information technologies SAIT 2011*, Kyiv, pp. 404, 2011.

РОЗДІЛ 6.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИПРОБУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ГЕОМЕТРИЧНИХ ТА МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТІВ МІКРОСИСТЕМНОЇ ТЕХНІКИ

В розділі представлені результати експериментального випробування розробленого методу комплексного нанометричного контролю характеристик пристроїв МСТ. Також наводиться порівняння цих результатів з результатами, отриманими базовим методом АСМ та альтернативними методами визначення механічних характеристик компонентів МСТ.

Розглянуті основні принципи оцінки та наведені результати визначення оптимальних режимів контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ.

Випробування розробленого в роботі методу підтверджує підвищення точності, чутливості, надійності та відтворюваності результатів контролю геометричних та механічних характеристик компонентів МСТ на базі розробленого інструментального та програмно-апаратного забезпечення для автоматизації проведення контролю з урахування дії дестабілізуючих факторів.

Представлені перспективи розширення функціональних можливостей методу АСМ: визначення товщини, механічних та електрофізичних характеристик тонких покриттів та поверхневого шару, а також характеристик масивних елементів та наноструктур.

На основі узагальнення результатів досліджень в розділі наводяться практичні рекомендації щодо використання розробленого методу комплексного контролю пристроїв МСТ в промисловості, наукових організаціях та в навчальному процесі закладів вищої освіти України. Показано, що ефективність впровадження розроблених підходів та запропонованої автоматизованої системи контролю залежить від повноти визначення задач, що ставляться перед такою системою, заходів щодо її реалізації і експлуатації та у відповідності до заданих вимог і рекомендацій.

6.1. Визначення геометричних та механічних характеристик пристроїв мікросистемної техніки при неруйнівному контролі методом атомно-силової мікроскопії за різних умов та термінів їх експлуатації

Усі експериментальні випробування проводилися на 3 – 6 зразках (у 9 – 12 точках на кожному зразку) із матеріалів, що знайшли широке використання при виготовленні компонентів МСТ, а саме: аморфного (a-Si) та полікристалічного (h-Si) кремнію, оптичного скла сорту “крони” марки К8, п’єзоелектричної кераміки марки ЦТС-19, біокераміки системи CEREC, оксидних та металевих покриттів на кремнієвій основі та нанорозмірних структур на них (див. п.2.1). В той же час, результати, отримувані при використанні запропонованих методик та з урахуванням теоретичних досліджень, проведених в дисертаційній роботі, підтверджувалися стандартизованими методами дослідження на атестованому обладнанні. При цьому, отримувані запропонованим методом дані корелювали з даними отримуваними альтернативними тестовими методами.

6.1.1. Дослідження стану та топології поверхні

Дослідження стану поверхні проводилося на експериментальних зразках, в якості яких виступали компоненти мікроактуатора із п’єзоелектричної кераміки марки ЦТС-19 зі срібними електродами, нанесеними на них, а також керамічні елементи датчика мікроакселерометру. При цьому, використовуючи розроблену автоматизовану систему, діагностувалися приладні артефакти на поверхнях таких зразків, визначалася їх топологія (розподіл по поверхні мікроутворень та наноструктур, а також нанорельєф поверхні) та проводилося профілювання окремих ділянок поверхні. Отримані результати порівнювалися з результатами досліджень, що проводилися за допомогою базового методу АСМ.

Так, діагностування артефактів проводилося на срібних електродах елементів із п'єзоелектричної кераміки ЦТС-19, що знаходилися в довготривалому зберіганні (з 2006 року) [1].

Результати діагностування приладних артефактів наведені на рис. 6.1.

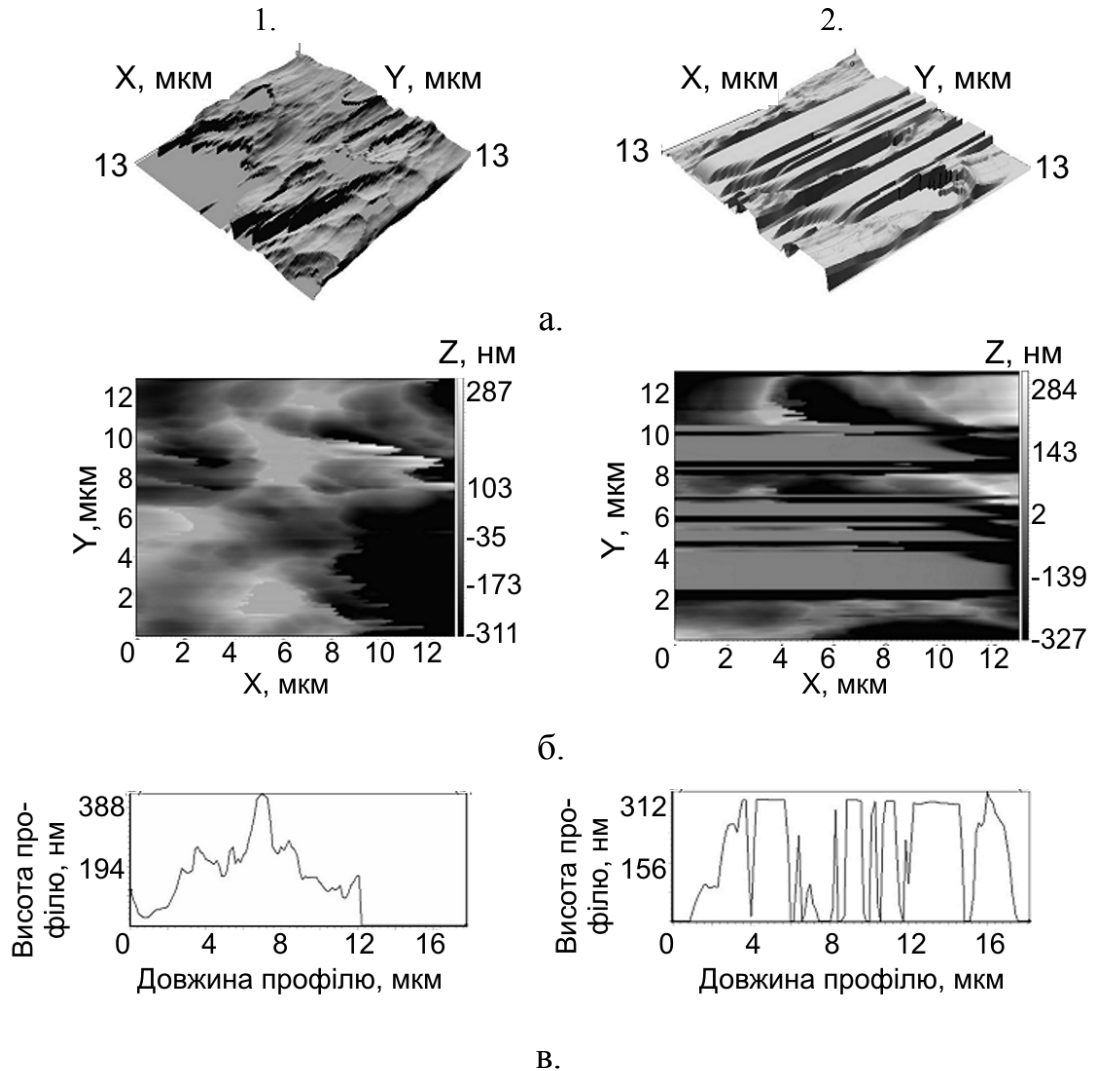


Рисунок 6.1 – Діагностування приладних артефактів на ділянці поверхні (13×13 мкм) провідного покриття (Ag) на п'єзoelementі мікроактуатора “АП-Б 1,0/01” (виробник: ТОВ "Аврора-ЭЛМА", Росія): а – трьохвимірне зображення досліджуваної ділянки поверхні; б – топограма поверхні; в – профіль поверхні ділянки уздовж головної діагоналі.

Діагностування проводилося за допомогою розробленої автоматизованої системи контролю (1) та за допомогою базового методу АСМ (2) за раціональних умов проведення експерименту АСМ-зображення

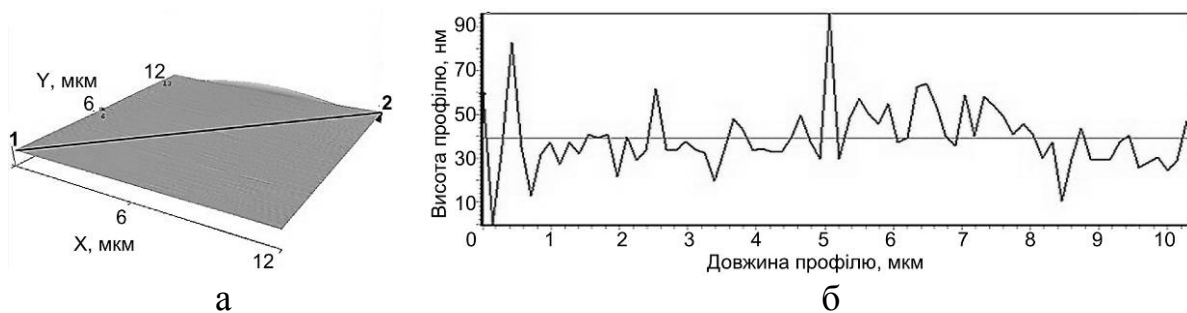
ділянок поверхні срібних електродів елементів із п'єзоелектричної кераміки ЦТС-19, що діагностувалися за допомогою розробленої автоматизованої системи (рис.6.1.1) показали набагато меншу кількість артефактів, пов'язаних з негативним впливом на зонд поверхневих сил взаємодії, на відміну від АСМ-зображень, отриманих за допомогою базового методу АСМ (рис.6.1.2). Так, на рис.6.1.2, а, б показано, що АСМ-зображення поверхні мають "зрізані" ділянки, що викликані "залипанням" кремнієвого зонду на досліджуваній поверхні під дією капілярних та електростатичних сил. Ці ділянки проявляються і на профілограмі поверхні (рис.6.1.2, в) у вигляді різких "провалів" профілю та гладких "зрізаних" ділянок на вершинах профілю. На відміну від базового методу, при використанні розробленої в дисертації автоматизованої системи контролю (рис.6.1.1) кількість таких ділянок майже не спостерігається.

Ще однією перевагою, запропонованого автором дисертації автоматизованої системи контролю, є можливість програмно-апаратного розширення зони проведення досліджень у вертикальній площині з 2 – 3 мкм до 4,5 – 6 мкм, чим розширюється номенклатура структурованих поверхонь виробів МСТ.

Так, при проведенні досліджень по визначенню профілю поверхні керамічних компонентів датчика мікроакселерометру "H3LIS331DL" (виробник: "STMicroelectronics", США), окрім розширення зони проведення досліджень у вертикальній площині більш, як у 2 рази, спостерігається значне покращення якості отримуваних топограм та профілограм (відсутні приладні артефакти та дисторсія поверхні), а також збільшення точності визначення мікрорельєфу поверхні.

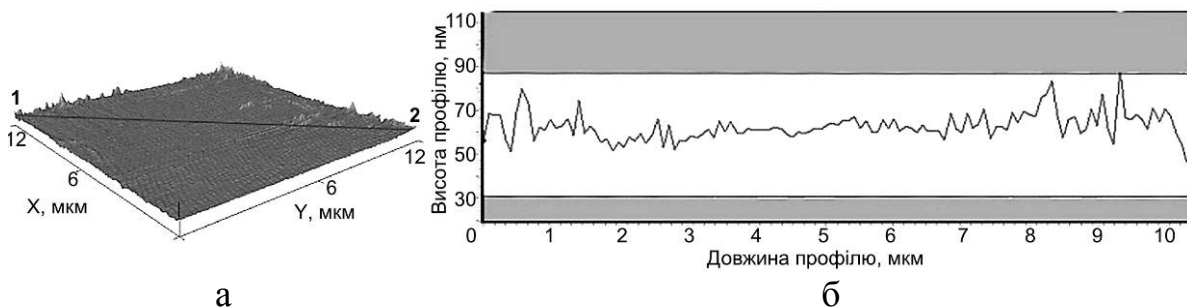
На рис. 6.2 наводяться результати дослідження стану поверхні таких виробів до введення у експлуатацію та після 10 років експлуатації.

При цьому, як видно з рис. 6.2, точність отримання топограм ділянки поверхні за допомогою розробленої автоматизованої системи збільшилася на 8 – 12% в порівнянні з результатами, отриманими базовою конструкцією АСМ

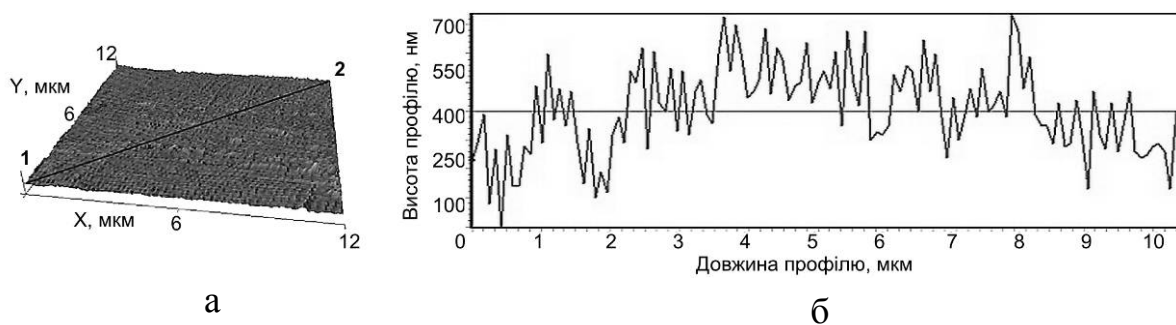


базовий метод АСМ

1

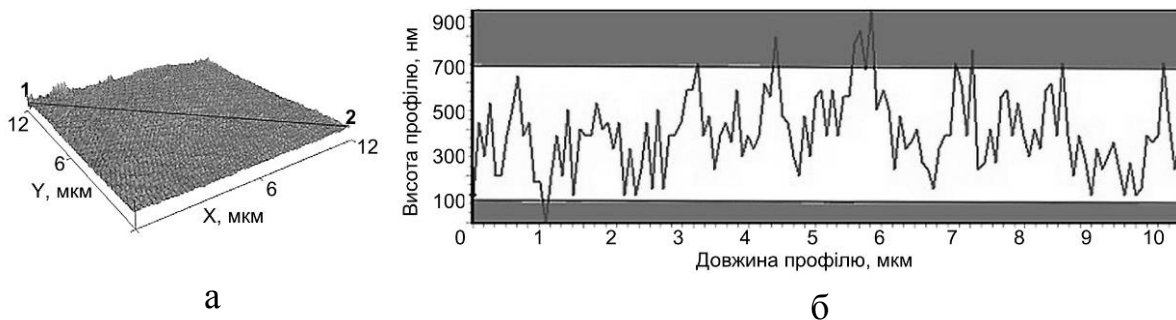


розроблена автоматизована система



базовий метод АСМ

2



розроблена автоматизована система

Рисунок 6.2 – Трьохвимірне зображення (а) та профіль (б) вздовж лінії 1 – 2 поверхні елементу датчика мікроакселерометру “НЗLIS331DL” до початку експлуатації (1) та після 10 років експлуатації (2)

Отримані профілограми при їх порівнянні з профілограмами,

отриманими альтернативними методами, а саме методом растрової електронної мікроскопії, також показали більшу відтворюваність між результатами, отриманими розробленою автоматизованою системою, та результатами, отриманими методом РЕМ [2]. Ще однією суттєвою перевагою системи є можливість встановлення обмеження по висоті профілю, а також визначення відношення площі поверхні, що виходить за дані обмеження, до повної площі поверхні ділянки, чим дозволяє динамічно відслідковувати зміну мікрогеометрії та кривизни площини поверхні.

В той же час, дослідження геометрії деяких тонких оксидних покриттів методом АСМ можуть давати неправдиві уявлення про нанорельєф поверхні та товщину нанесеного покриття.

Так, в роботі [3] наводяться результати дослідження складного оксидного покриття $\text{CuO-BaO-La}_2\text{O}_3$, товщиною до 400 нм, яке є тугоплавким, достатньо твердим, хімічно-інертним та малорозчинним в інших оксидах металів, що дозволяє використовувати таке покриття в якості різального мікроінструменту (мікробурів, наносвердел, тощо).

Дослідження покриття проводилося в трьох-чотирьох зонах – на поверхні основи (кварцу), на яку наносилося покриття; на границі “основа – покриття” та, безпосередньо, на поверхні покриття, рис. 6.3.

При проведенні експерименту аналізувалися, як стан поверхонь досліджуваних ділянок (рис. 6.3, а, б), так і нанорельєф поверхонь по профілограмам, що отримувалися вздовж головної діагоналі досліджуваної ділянки (рис. 6.3, в).

За результатами проведених досліджень встановлено (рис. 6.3), що найбільше відхилення рельєфу від горизонталі спостерігалось з боку покриття поблизу границі “основа – покриття”.

За фрагментами зразків покриттів $\text{CuO-BaO-La}_2\text{O}_3$, згідно методики (п.2.2.2) визначалася їх товщина, яка становила 280 – 350 нм (рис. 6.3, в).

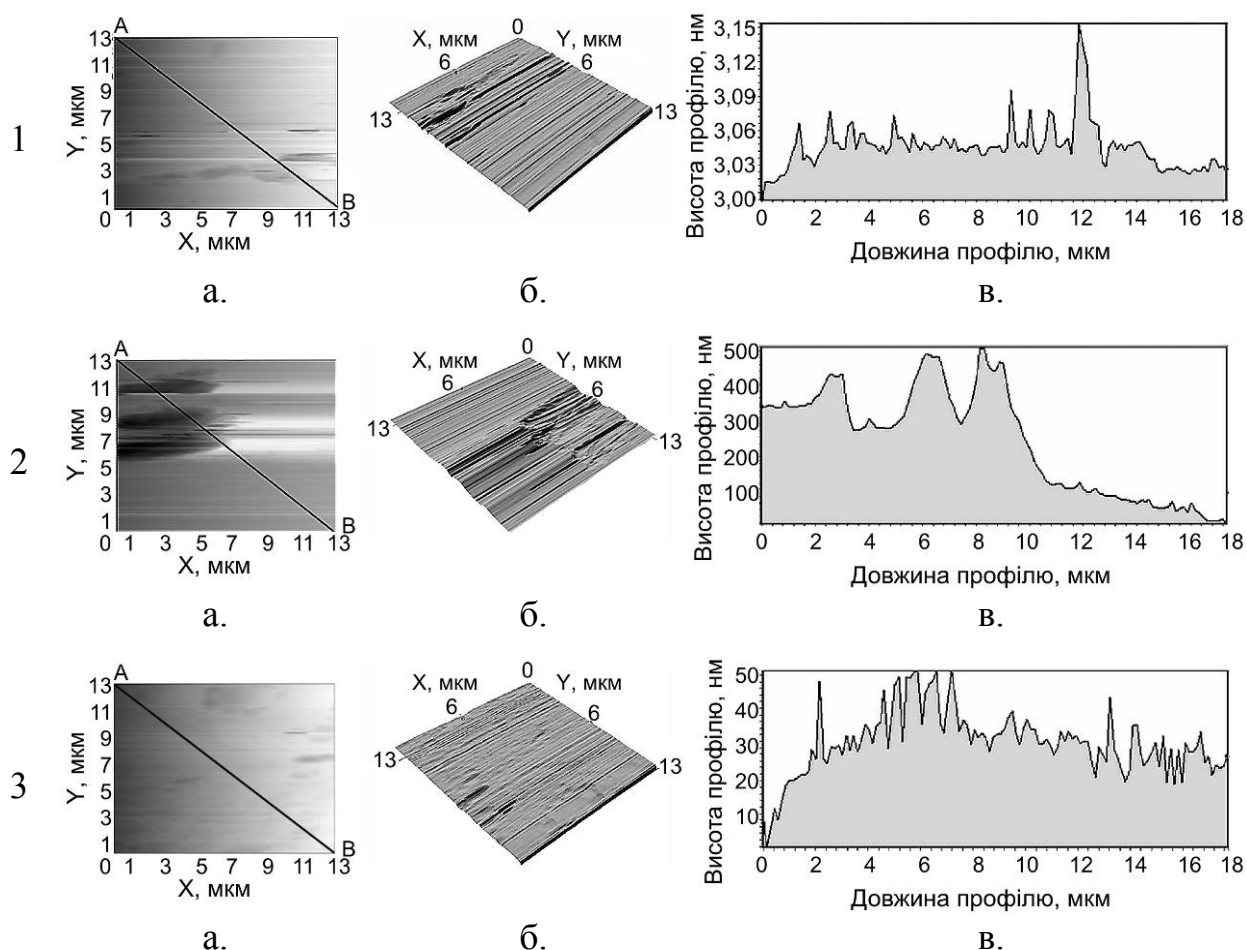


Рисунок 6.3 – Топограма (а), трьохвимірне зображення (б) площадки поверхні (13×13 мкм), профілограма вздовж лінії АВ (в) по поверхні основи (1), на границі «основа-покриття» (2) та по поверхні покриття $\text{CuO-BaO-La}_2\text{O}_3$ (3)

Отримані результати підтверджувалися методом інтерференційної мікроскопії на повіреному приладі “МІІ-4М” (діапазон вимірювань 0,1 – 0,8 мкм; абсолютна точність вимірювань 5 – 20 нм) [4], за допомогою якого визначені середні значення товщини цих покриттів в діапазоні 285 – 335 нм. Розбіжність значень товщини визначеної за вищезазначеною методикою та значень отриманих інтерференційною мікроскопією становила 1,8 – 4,3%.

При цьому, методом АСМ встановлено [5], що при збільшенні товщини покриттів спостерігалася більша однорідність покриття та рівномірність розподілу мікронерівностей по їх поверхні, рис. 6.4.

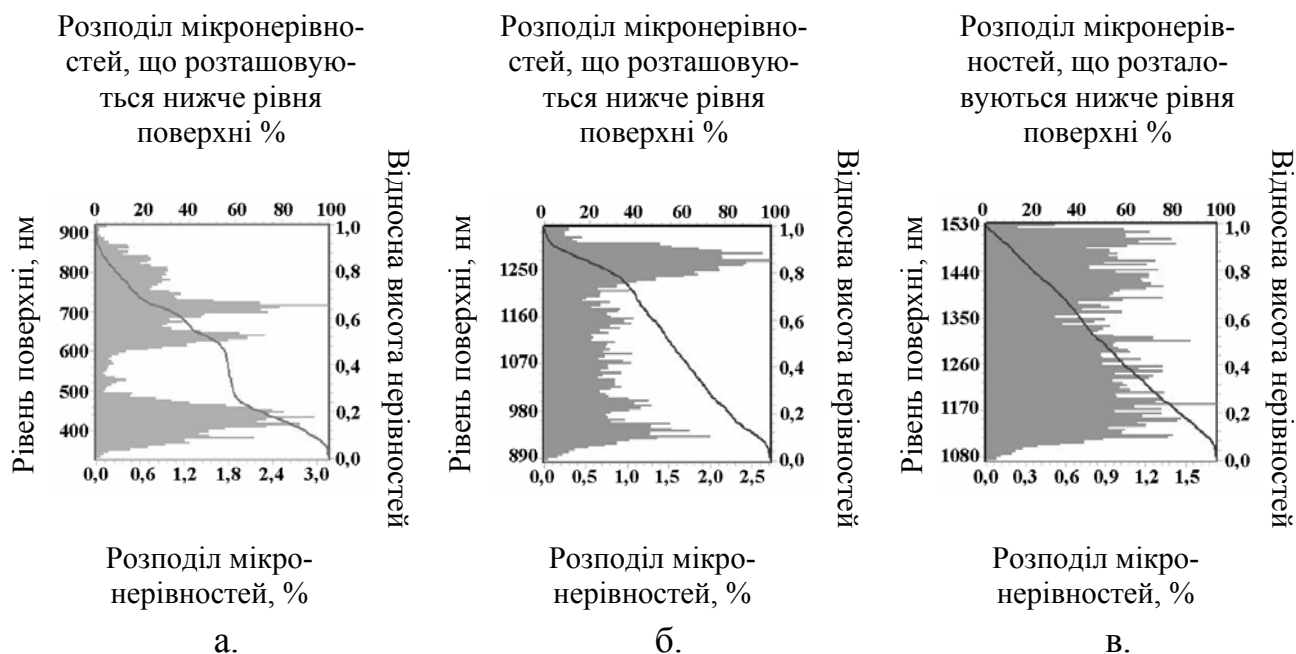


Рисунок 6.4 – Гістограми розподілу мікронерівностей по поверхні покриття $\text{CuO-BaO-La}_2\text{O}_3$ товщиною 285 нм (а), 320 нм (б) та 345 нм (в)

Таким чином, визначення геометрії поверхні (наявність артефактів АСМ-зображення, мікрорельєф та товщина покриття) із залученням розробленої в роботі автоматизованої системи дозволяє мінімізувати кількість артефактів на поверхні АСМ-зображення компонентів МСТ, визначати з високою точністю (відносна похибка не перевищувала 4,5%) та якістю нанорельєф та товщину нанесеного покриття, а також розширити діапазон значень топології у вертикальній площині з 2 – 3 мкм до 4,5 – 6 мкм.

6.1.2. Дослідження та аналіз морфології поверхні

Дослідження та аналіз морфології поверхні проводилося на елементах із п'єзоелектричної кераміки ЦТС-19, що не були в експлуатації, а також експлуатувалися протягом п'яти та 10 років [1].

В результаті дослідження та аналізу морфології поверхні матеріалів, рис. 6.5, встановлено [6], що на початку експлуатації поверхня була менш розвинутою, з більш однорідною морфологією, на ній майже відсутні

мікроефекти. Тоді як після п'яти років експлуатації в умовах технологічної лабораторії, а, особливо, після десяти років, поверхня більш розвинута, має менш однорідну морфологію, а кількість мікроефектів збільшується у 2,5 – 5,5 рази.

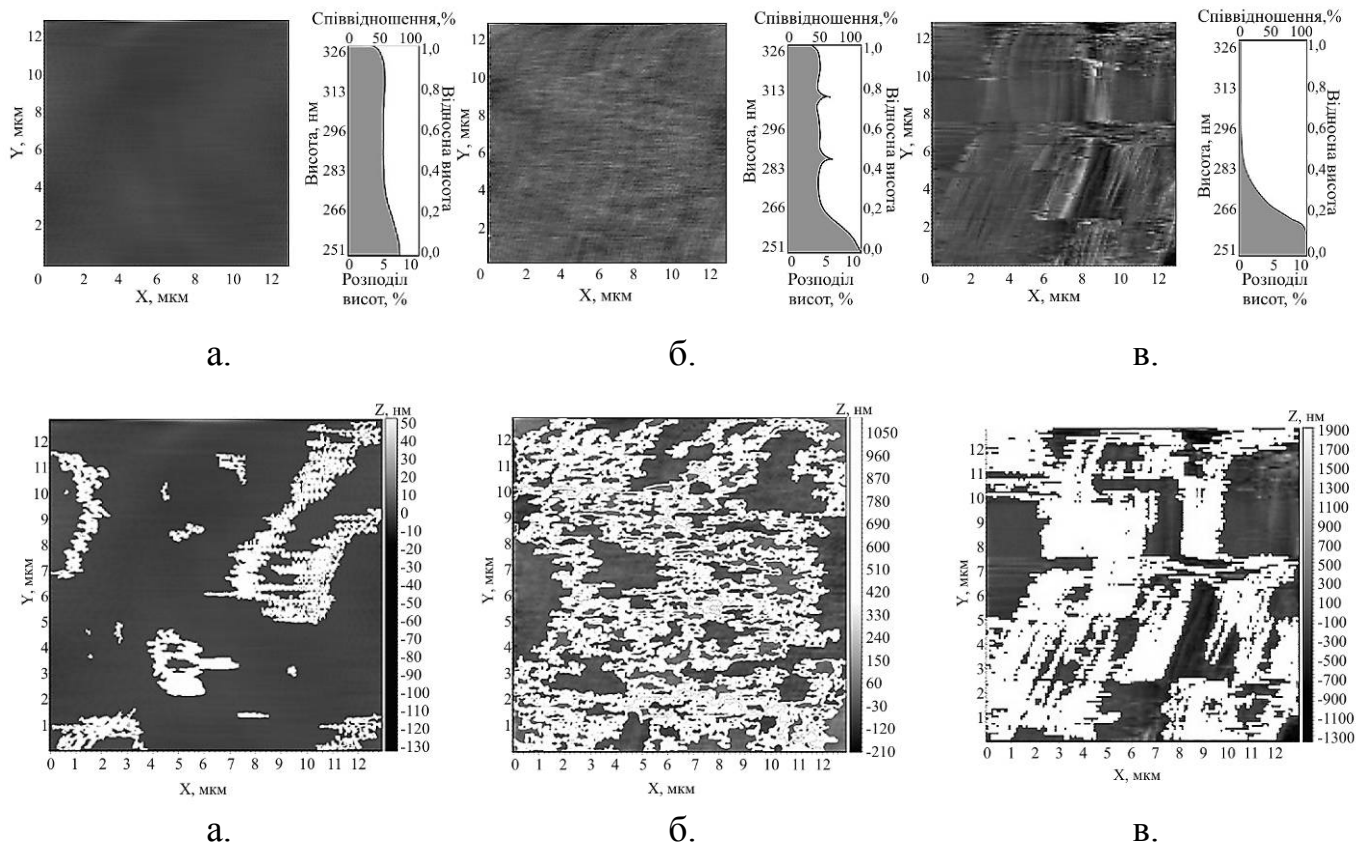


Рисунок 6.5 – Топограма поверхні та гістограма розподілу нерівностей по кількості для різних висот (верхня частина рисунку), а також динаміка розвитку морфології поверхні (нижня частина рисунку) для кераміки ЦТС-19, що не використовувалася (а), після п'яти (б) та після 10 років використання (в) в лабораторних умовах. Прилад: атомно-силовий мікроскоп “NT-206”.

Підтвердження отриманих результатів морфології поверхні проводилося на растровому електронному мікроскопі “ZEISS EVO 50 XVP” (виробник: “GmbH Carl Zeiss”, Німеччина), в Центрі колективного користування Інституту надтвердих матеріалів ім. В.Н. Бакуля НАН України (м.Київ), рис. 6.6 [7], [8].

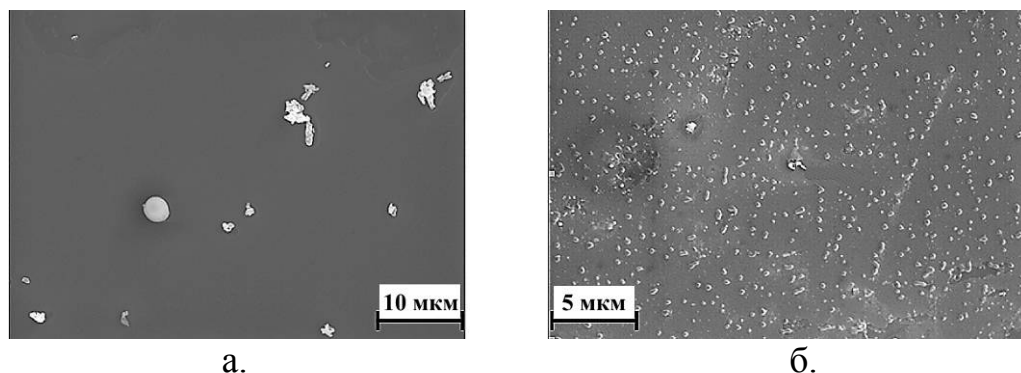


Рисунок 6.6 – Результати досліджень морфології поверхні для кераміки системи ЦТС, що не використовувалася (а) та після 10 років використання (б) в лабораторних умовах. (Електронний мікроскоп “ZEISS EVO 50 XVP”).

Результати дослідження морфології поверхні п'єзоелектричної кераміки системи ЦТС отримані методом растрової електронної мікроскопії показали суттєве збільшення кількості мікродефектів після 10 років експлуатації компонентів актуаторів з цього матеріалу. Так, досліджувана ділянка поверхні, до експлуатації мала щільність мікродефектів максимальних розмірів до 2 мкм, яка не перевищувала 3 мкм^{-2} , тоді, як після 10 років експлуатації, щільність мікродефектів досягала 16 мкм^{-2} , що перевищує початкове значення щільності у 5,3 рази.

Таким чином встановлена можливість визначення мікропор та інших мікродефектів (у тому числі й прихованих у поверхневому шарі) на поверхні компонентів МСТ за допомогою аналізу результатів їх морфології, отриманих методом АСМ. Показано, що, в протигагу від методу РЕМ, метод АСМ має програмний апарат, що з більш високою точністю (у 1,5 – 2,3 рази ніж методом РЕМ) дозволяє визначати щільність мікродефектів мінімальних розмірів від 0,05 мкм [9].

6.1.3. Визначення механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки

Визначення механічних характеристик компонентів МСТ

(мікротвердості, зносостійкості, а також адгезійної міцності та внутрішнього тертя тонких покриттів) здійснюється за розробленим в дисертаційному дослідженні методично-апаратним та програмним забезпеченням.

Визначення мікротвердості поверхонь компонентів МСТ, а також тонких покриттів на них здійснювалося за методиками, описаними в пп.2.2.1-2.2.2 із застосуванням кремнієвих зондів, модифікованих тонкими вуглецевими покриттями (п.5.2.1). При цьому досліджувалися корпуси мікропристроїв (матеріал корпусу: кремній марки Кр0), растри мікролінз з оптичного скла К8 для ПЗЗ-фотоприймачів, а також металеві (Au, Ag) та оксидні покриття (SiO_2 , HfO_2 , Al_2O_3 та $\text{CuO-BaO-La}_2\text{O}_3$) різного функціонального призначення, які були осаджені на кремнієвих підкладках.

Результати дослідження мікротвердості методом АСМ (на прикладі кремнієвого зразка) і його аналіз наведено на рис. 6.7 [10] – [12].

Навантаження на зонд становило $7,7 \cdot 10^{-4}$ Н. За такого навантаження встановлено, що зонд заглиблювався в зразок на глибину 55 нм, а площа контакту складала $662,6 \cdot 10^{-16}$ м².

Проводячи подальші розрахунки за методикою, детально описаною в п.2., знаходиться мікротвердість досліджуваного зразка, яка становить 11,62 ГПа. З довідкових даних значення мікротвердості кремнію марки Кр0 12,6 ГПа (розбіжність між розрахунковими та експериментально отриманими даними не перевищує 8%).

В той же час, окрім високої точності визначення мікротвердості однорідних поверхонь, розроблене методично-апаратне забезпечення дозволяє визначати мікротвердість тонких покриттів, мінімізуючи вплив підкладки, на яку нанесене покриття.

Так, визначення мікротвердості для ряду покриттів нанесених на кремнієву підкладку проводилося шляхом поступового збільшення навантаження на наноіндентор до максимального значення з подальшим збільшенням часу дії і показало наступне [13]:

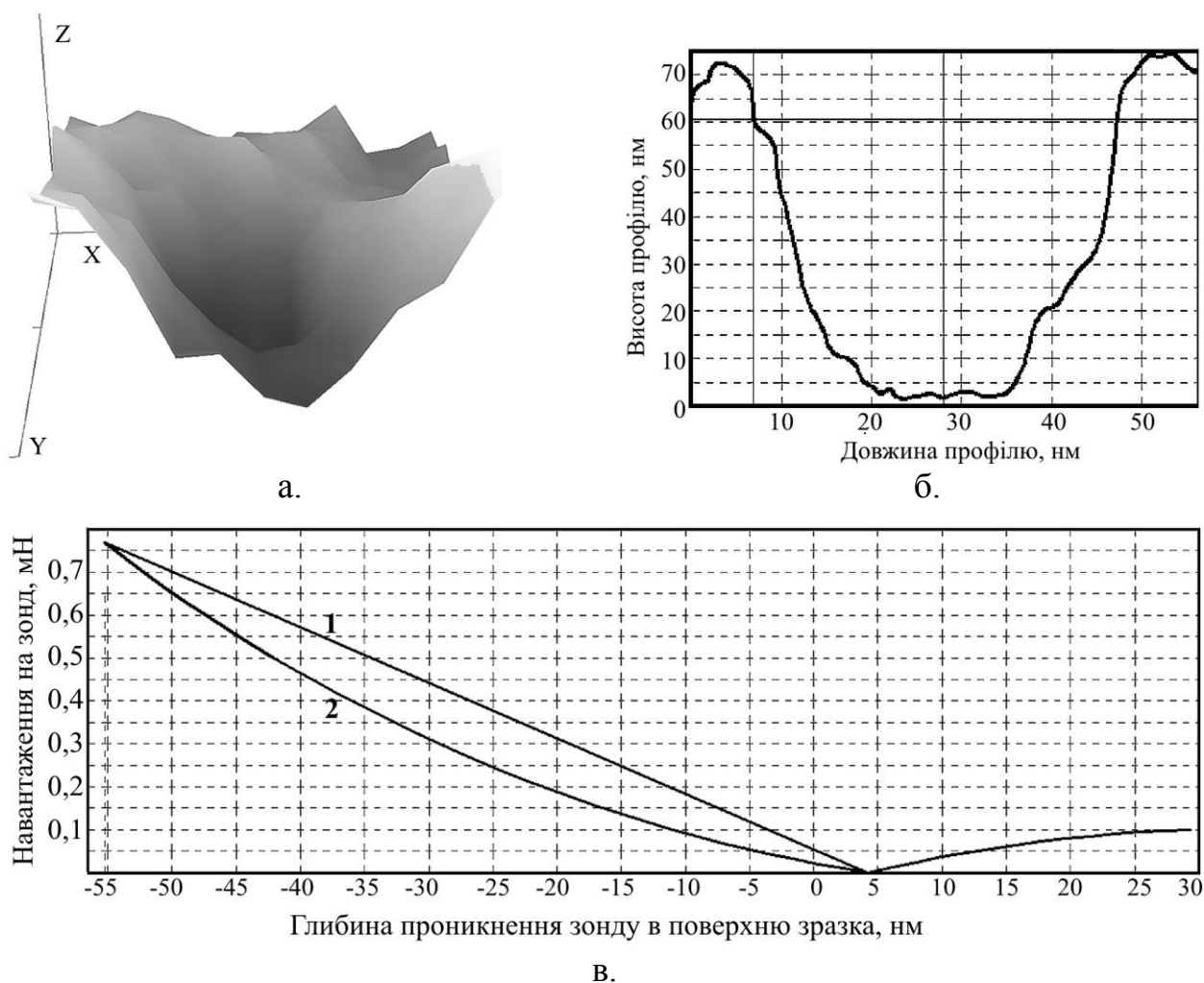


Рисунок 6.7 – Тривимірне АСМ-зображення ділянки поверхні (а) кремнієвої пластини (ділянка 70×70 нм) з відбитком АСМ-наноіндентора, профіль відбитка зонда АСМ-наноіндентора модифікованого функціональним вуглецевим покриттям (б), залежність навантаження на зонд від глибини проникнення зонда при його проникненні (1) та відведенні (2) від досліджуваної поверхні (в)

- для покриття SiO_2 : навантаження на зонд 0,55 мН; час дії 15 с.; встановлене значення мікротвердості: $H = 9,63$ ГПа;
- для покриття HfO_2 : навантаження на зонд 0,83 мН; час дії 17 с.; встановлене значення мікротвердості: $H = 8,13$ ГПа;
- для покриття Al_2O_3 : навантаження на зонд 0,72 мН; час дії 9 с.; встановлене значення мікротвердості: $H = 6,24$ ГПа;
- для покриття Ag: навантаження на зонд 0,38 мН; час дії 13 с.;

встановлене значення мікротвердості: $H = 2,28$ ГПа.

– для покриття Au: навантаження на зонд 0,15 мН; час дії 11 с.; встановлене значення мікротвердості: $H = 0,86$ ГПа.

При цьому, проводячи дослідження зміни мікротвердості покриттів в діапазоні товщини до 20 нм, спостерігалось стрибкоподібне зменшення значення мікротвердості цих покриттів у міру їх потовщення від 0,5 нм з 11,62 ГПа (мікротвердість кремнієвої підкладки) до 6,24 – 9,63 ГПа (для SiO_2 , HfO_2 , Al_2O_3) і до 0,86 ГПа (для покриття із золота) при товщині покриття 20 нм, рис. 6.8 [12].

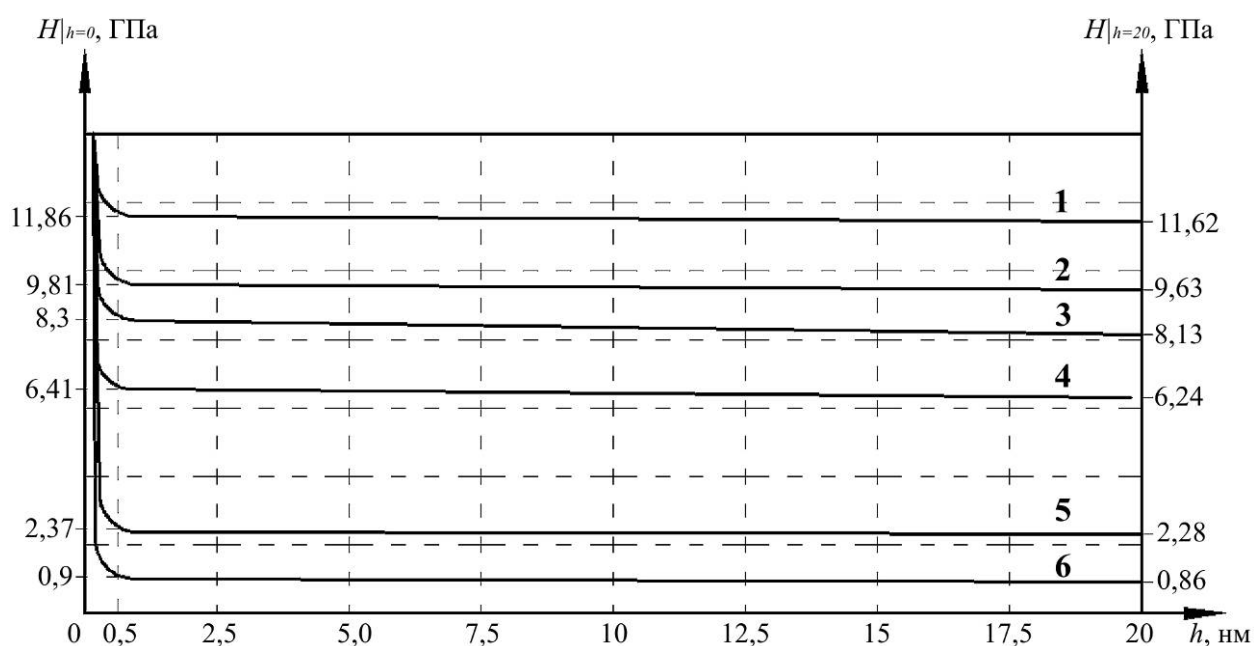


Рисунок 6.8 – Залежності мікротвердості тонких покриттів H на кремнієвій підкладці від їх товщини h : 1 – кремнієва підкладка Cr_0 ; 2 – покриття SiO_2 ; 2 – покриття HfO_2 ; 3 – покриття Al_2O_3 ; 4 – покриття Ag; 5 – покриття Au

Цей факт можна пояснити тим, що при малій товщині осаджуваних матеріалів (до 0,5 нм) покриття, яке сформувалося не є однорідним, що пов'язано з "острівцевою" теорією формування плівок [14]. В зв'язку з цим, проникнення індентора відбувається в матеріал основи – тобто, фактично, визначається мікротвердість підкладки (кремнію). Далі, у міру збільшення товщини плівки від 0,5 до 20 нм відбувається плавне зниження мікротвердості цих покриттів на 2 – 11%. Таке зниження мікротвердості

можна пояснити збільшенням пір та мікротріщин у міру зростання плівки при термовакuumному осадженні, чим знижується щільність покриттів.

Точність визначення мікротвердості для різних матеріалів в залежності від глибини проникнення зонду в досліджувану поверхню, наведена на рис. 6.9.

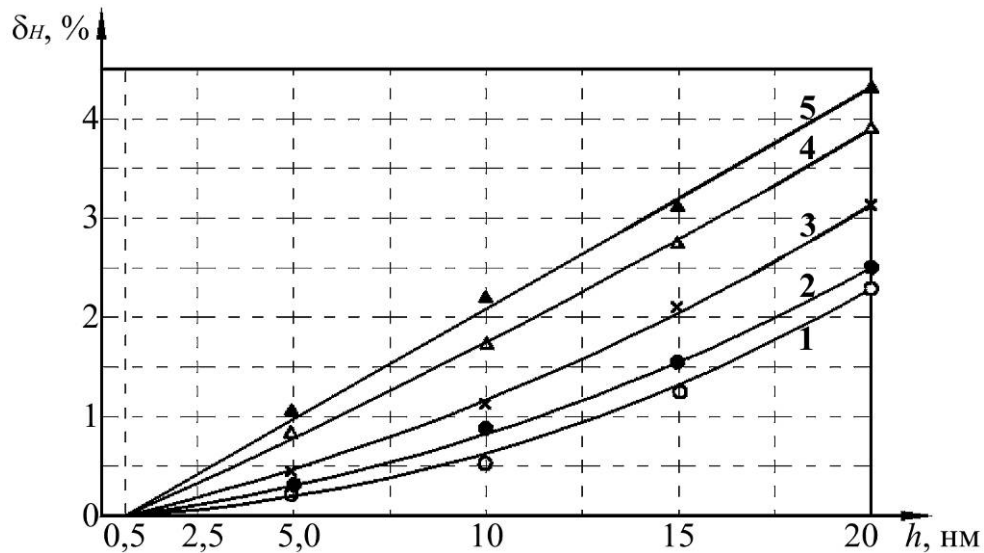


Рисунок 6.9 – Залежності відхилення величини мікротвердості тонких покриттів на кремнієвій підкладинці від глибини проникнення наноіндентора в поверхню:

- , 1 – отримані експериментально та апроксимовані дані для покриття SiO_2 ;
- , 2 – отримані експериментально та апроксимовані дані для покриття HfO_2 ;
- ×, 3 – отримані експериментально та апроксимовані дані для покриття Al_2O_3 ;
- Δ, 4 – отримані експериментально та апроксимовані дані для покриття Ag;
- ▲, 5 – отримані експериментально та апроксимовані дані для покриття Au

Як видно із залежностей, представлених на рис.6.9, точність визначення мікротвердості покриттів зі збільшенням глибини проникнення зонду збільшується в середньому на 1,8–4,4%. В той же час точність визначення мікротвердості для оксидних покриттів встановлена лише до значень до 20 нм глибини проникнення наноіндентора в їх поверхню. Це пов'язано з виникненням критичних механічних напружень, що призводять до руйнування зонду АСМ при його проникненні на більшу

глибину.

Остаточо, результати визначення мікротвердості тонких покриттів за авторською методикою, значення мікротвердості цих покриттів встановлені в літературних джерелах [15] – [18], а також їх порівняння наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 – Результати визначення та порівняння мікротвердості тонких покриттів на кремнієвій основі

Матеріал покриття	Параметри визначення мікротвердості			Значення мікротвердості за альтернативними літературними джерелами, ГПа	Відхилення розрахункового значення мікротвердості від значення, зазначеного в літературі
	Навантаження на зонд, мН	Час дії наноіндентора, с	Встановлене значення мікротвердості, ГПа		
SiO ₂	0,55	15	9,63	9,50	1,37%
HfO ₂	0,83	17	8,13	7,46	8,9%
Al ₂ O ₃	0,72	9	6,24	6,20	0,65%
Ag	0,38	13	2,28	2,40	5%
Au	0,15	11	0,86	1,06	18,87%

Таким чином, обмеження у застосуванні методу АСМ для наноіндентування поверхонь пристроїв МСТ та тонких покриттів виражалося діапазоном навантажень у 0,05 – 1,25 мН, які прикладалися до зонду в процесі визначення мікротвердості, а також максимальної глибини проникнення (порядку 60 нм для металевих та до 20 нм для оксидних покриттів). Це становило діапазон значень мікротвердості: 100 МПа – 39 ГПа, що значно перевищує діапазон значень мікротвердості 477 МПа – 11 ГПа при її визначенні базовим методом АСМ.

Зносостійкість визначалася склерометричним методом для тонких металевих та оксидних покриттів SiO₂, HfO₂, Al₂O₃, Ag та Au товщиною порядку 50 нм за наступних режимів: навантаження зонду при дії на

покриття SiO_2 – $6 \cdot 10^{-4}$ Н; при дії на HfO_2 – $8 \cdot 10^{-4}$ Н; при дії на Al_2O_3 – $6,8 \cdot 10^{-4}$ Н; при дії на Ag – $5,3 \cdot 10^{-4}$ Н; при дії на Au – $5 \cdot 10^{-4}$ Н.

АСМ-зображення результату склерометрії на прикладі SiO_2 -покриття на оптичному склі К8 наведено на рис. 6.10 [19].

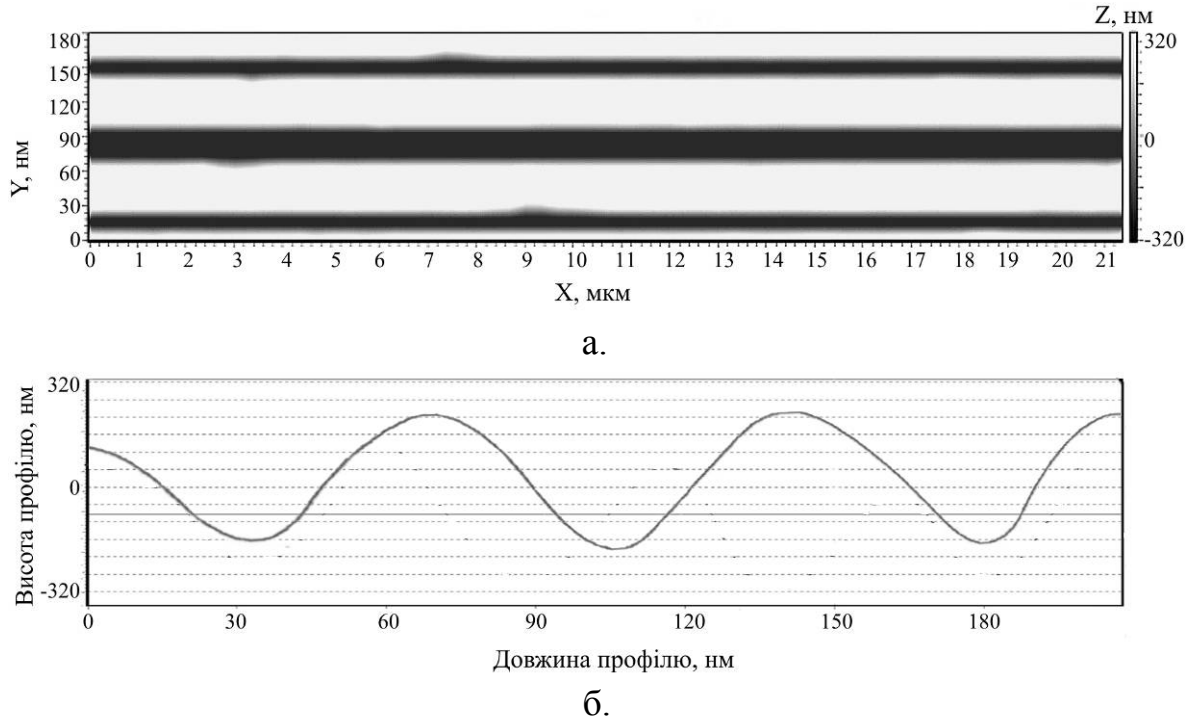


Рисунок 6.10 – АСМ-зображення (а) та топограма (б) результату склерометричного випробування на зносостійкість тонкого покриття SiO_2 товщиною 50 нм, нанесеному на мікролінзовий растр з оптичного скла К8

Як видно з рис.6.10, треки, що отримувалися внаслідок дії зонду, однакової інтенсивності та безперервні, що говорить про високу однорідність досліджуваних покриттів, і, відповідно, високу точність визначення коефіцієнту зносостійкості k . Загалом, дослідження однотипних зразків, що проводилися серіями показали високу збіжність результатів визначення коефіцієнту зносостійкості, значення якого для різних матеріалів покриттів наведено в табл. 6.2.

Як видно із даних, представлених в табл.6.2, точність визначення зносостійкості металевих та оксидних покриттів корелює з їх табличними значеннями [20] (розбіжність між розрахунковими та табличними значеннями не перевищує 7%).

Таблиця 6.2 – Результати дослідження покриттів на зносостійкість

Матеріал покриття	Розрахункові параметри		Критерій зносостійкості, k	
	Середня площа перетину видавленого матеріалу, S_g^{cp} , нм^2	Середня площа перетину зміщеного матеріалу S_c^{cp} , нм^2	Розрахункове значення	Табличне значення [20]
SiO_2	90	30	23,1	22
Al_2O_3	83	37	48,2	45
HfO_2	107	40	18,3	18
Ag	67	15,6	39,2	40
Au	85	11,8	8,6	10
C (алмазо-подібне)	—	—	—	100

За результатами дослідження видно [21], що розрахункове значення критерію зносостійкості для оксидних покриттів дещо вищі за табличні, тоді, як для металевих покриттів – навпаки – нижчі. Це може бути пов’язано з тим, що металеві покриття більш в’язкі, тому зонд-індентор АСМ при багаторазовому терті по покриттю, “затирає” останнє, що робить його більш ковзким, чим штучно зменшує зносостійкість цих покриттів. Для оксидних покриттів, твердість яких співрозмірна з твердістю індентору спостерігається “залипання” зонду на поверхні, що й веде до незначного (порядку 5-7%) збільшення значення критерію зносостійкості в порівнянні з табличними даними. Проте, враховуючи суб’єктивність визначення критерію зносостійкості (визначається в умовних одиницях відносно зносостійкості алмазу) можна вважати розбіжність між розрахунковими та табличними значеннями критерію зносостійкості допустимою, а отримані за запропонованою методикою склерометрії дані такими, що відповідають дійсності.

Визначення модуля пружності зразків з покриттям, а також сили пружності поверхні від глибини деформування різноманітних матеріалів проводилося за методом АСМ в режимі силової спектроскопії, в основі якого лежить реєстрація залежностей, які відображають відхилення консолі АСМ при взаємодії вістря зонду з досліджуваною поверхнею.

Для розрахунку абсолютного значення модуля Юнга по силовим кривим використовується модель Герца [22], в якій розглядається взаємодія жорсткої півсфери (вістря АСМ-зонду) і нескінченної площини (поверхня зразка). В цьому випадку сила взаємодії зонда в залежності від глибини його проникнення в площину визначається виразом:

$$F = \frac{4\sqrt{R}}{3} \cdot E^* \cdot \Delta h^{3/2}, \quad (6.1)$$

де F – сила навантаження зонду, що діє на зразок; R – радіус закруглення вістря зонду; Δh – глибина проникнення зонду в поверхню зразка; E^* – ефективний модуль Юнга системи “зонд – зразок”.

Для отримання значень модуля Юнга з використанням моделі Герца відбувається перетворення взаємодії вістря зонду з досліджуваною поверхнею в залежності від відстані між ними. Даний метод визначення модулю Юнга поверхні є відносно простим з теоретичної точки зору, проте для отримання кількісних даних бажано, щоб АСМ-зонд мав вістря відомого діаметру.

Результати експериментів по визначенню модуля Юнга та сили пружності тонких покриттів від глибини Δh проникнення зонду в поверхню зразка наведені на рис. 6.11.

Слід відзначити, що точність значень модуля Юнга, одержуваних описаним методом, становить 8 – 15%, що є непоганим показником для отримання об'єктивних даних про пружні властивості ультратонких покриттів на компонентах МСТ.

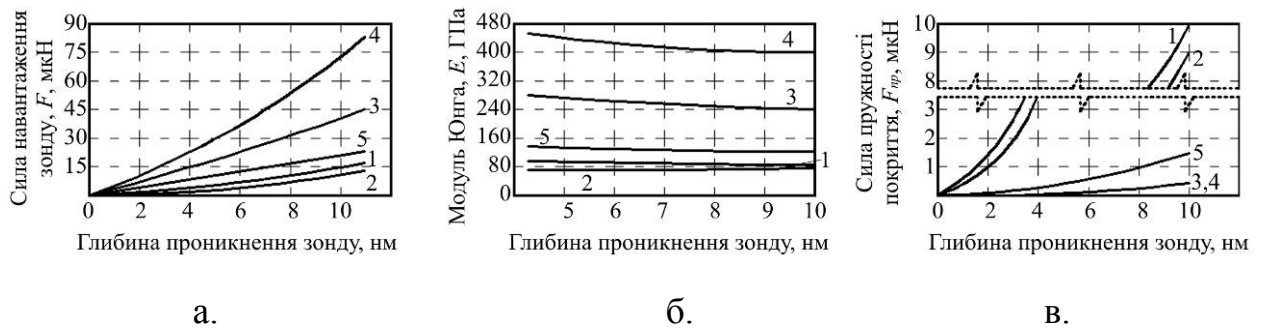


Рисунок 6.11 – Результати визначення модуля Юнга та сили пружності тонких покриттів: а – силові криві, отримані з експерименту; б – залежність модуля Юнга E зразків та сили пружності тонких покриттів F_{sp} (в) від глибини Δh проникнення зонду в поверхню зразка.

Покриття товщиною 20 нм: 1 – Au; 2 – Ag; 3 – HfO₂; 4 – Al₂O₃; 5 – CuO-BaO-La₂O₃

Також проводилося дослідження внутрішнього тертя в тонких плівках за профілями АСМ (рис. 6.12), що дозволило отримати інформацію про внесок міжфазних поверхонь та про вплив матеріалу підкладки на стабільність та рівномірність мікрогеометрії поверхні [23].

В якості досліджуваних зразків використовувалися вироби з оптичного скла К8, на поверхні якого формувалися металеві (Au, Ag) та оксидні покриття (HfO₂, Al₂O₃ та CuO-BaO-La₂O₃) товщиною, порядку 20 нм. Для цих виробів, за допомогою розробленої системи контролю на базі АСМ, визначався розподіл нерівностей поверхонь в різних зонах: на основі, на границі “покриття – основа” та на поверхні самого покриття, рис. 6.12, а-в.

При цьому, визначення розподілу сил тертя полягає у програмному видаленні масиву значень точок, що визначають профіль поверхні основи із масиву значень точок, що визначають профіль поверхні покриття. Тоді профіль границі “покриття – основа” служить для визначення середнього рівня відносно якого відбувається видалення профілів, рис. 6.12, г.

Визначивши розподіл сил тертя в тонких плівках від різного навантаження на вимірювальний зонд АСМ, за формулою: $F_{тр} = \mu N$, де μ – визначуваний коефіцієнт тертя, N – сила нормального опору поверхні на

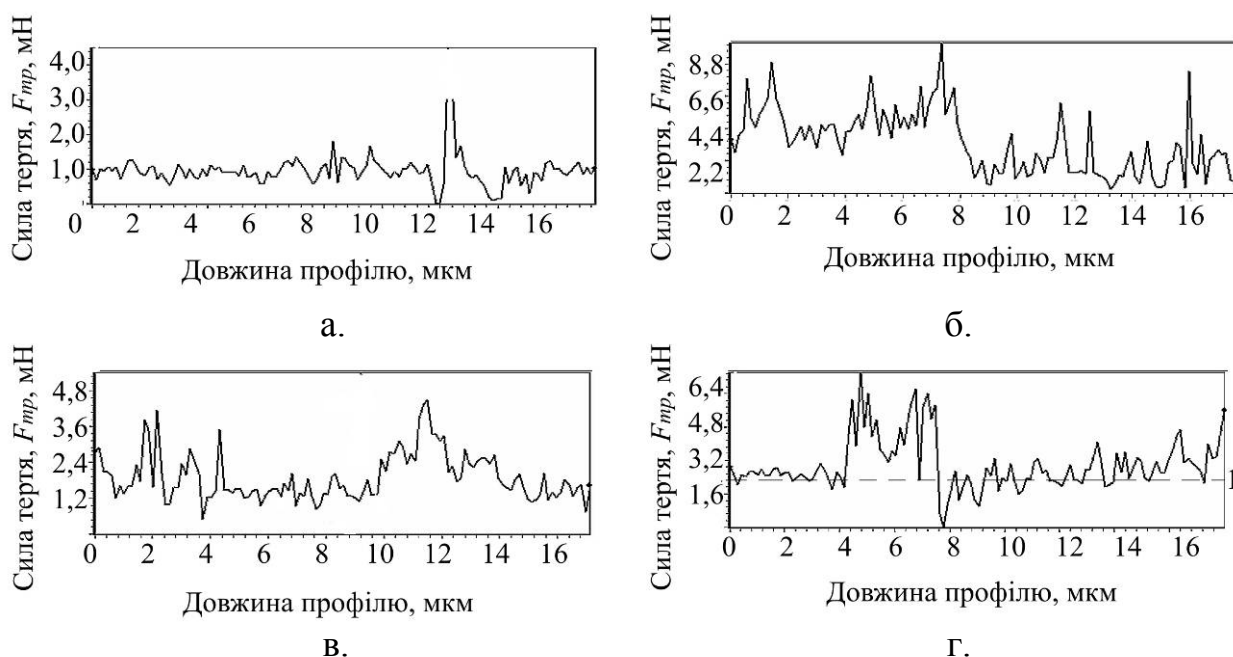


Рисунок 6.12 – Розподіл сил тертя (внутрішніх напружень) по поверхні основи (а), на границі “основа-покриття” (б), на поверхні покриття $\text{CuO-BaO-La}_2\text{O}_3$ (в) та результат визначення результуючого розподілу сил тертя в тонких покриттях (г). 1 – усереднене значення сили тертя вздовж заданого профілю від фіксованого навантаження на поверхню покриття.

дію зовнішнього зусилля (згідно III закону Ньютона, модуль цієї сили дорівнює нормальному навантаженню на поверхню плівки з боку зонду), можна знайти залежність коефіцієнту тертя від навантаження на поверхню тонких покриттів, рис. 6.13.

Також встановлено, що величина загасання внутрішнього тертя для складних оксидних покриттів ($\text{CuO-BaO-La}_2\text{O}_3$) у середині шару та на міжфазній границі різна. Оскільки дані композиції мають високодисперсну структуру, можна припустити, що значення внутрішнього тертя у середині шару пов'язано з наявністю меж розділення між ($\text{CuO-BaO-La}_2\text{O}_3$) та SiO_2 основи та високою густиною приповерхневих мікрodefектів та дислокацій.

Це одна механічна характеристика компонентів МСТ, що підлягала визначенню за допомогою запропонованої автоматизованої системи є адгезійна міцність зчеплення матеріалу покриття з основою. Визначення адгезійної міцності зчеплення проводилося як описано в роботі [24].

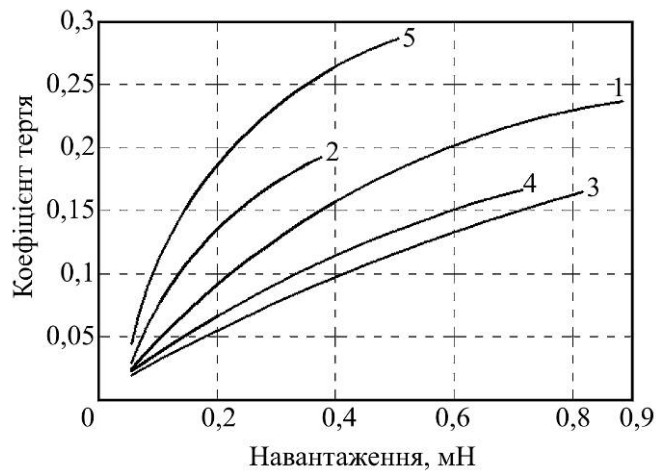


Рисунок 6.13 – Залежність коефіцієнту тертя в тонких плівках від навантаження на їх поверхню. Покриття товщиною 20 нм:

1 – Au; 2 – Ag; 3 – HfO₂; 4 – Al₂O₃; 5 – CuO-BaO-La₂O₃

В якості прикладу визначення адгезійної міцності використовувалися зразки мікродзеркал (16×16 мкм) оптичної системи DMD-матриці для проектування зображення “Acer C120”, що представляють собою пластини розмірами 8×14 мм із оптичного скла з нанесеним на нього тонким шаром (товщина 9 нм) Al₂O₃. Аналіз серії отриманих профілів [23] при скануванні таких зразків (рис. 6.14), дозволяє, окрім кількісного визначення адгезійної міцності покриття, оцінити її зміну зі збільшенням товщини такого покриття.



Рисунок 6.14 – Профілі розподілу адгезійної міцності вздовж поверхні пластини з оптичного скла з покриттям Al₂O₃ (товщина покриття 10 нм) в залежності від глибини проникнення зонда АСМ: 1 – $h = 0$ (поверхня покриття); 2 – $h = 3$ нм; 3 – $h = 6$ нм; 4 – $h = 10$ нм (межа між діелектричною пластиною та оксидним покриттям).

Проведені дослідження адгезійної міцності тонких оксидних покриттів на діелектричних матеріалах методом АСМ дозволили встановити, що зі збільшенням товщини покриття, його адгезійна міцність зменшується по експоненціальному закону.

Таким чином, проведення досліджень та порівняння отриманих результатів з результатами, отриманими альтернативними методами (растрової електронної мікроскопії, мікротвердометрії за Вікерсом тощо), встановлена висока точність (похибка визначення механічних характеристик не перевищує 7 – 8%) та надійність (ймовірність безвідмовної роботи вимірювальної системи, не менше 0,98) вдосконалених методу та засобів АСМ за умов використання оптимальних робочих режимів сканування.

6.2. Оцінка оптимальних режимів контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки

Визначення та оцінка оптимальних режимів контролю геометричних та механічних характеристик методом АСМ, що дозволяє підвищити точність, чутливість, надійність та швидкодію, а також провести практичну реалізацію запропонованої автоматизованої системи контролю, полягала у вирішенні задачі параметричної оптимізації з використанням критерію оптимізації по мінімальному відхиленні форми та розмірів інструменту, яке не має перевищувати 5% від його початкових значень.

Для цього, скориставшись методикою оптимізації режимів контролю (див. п.2.2.4), при наступних значеннях коефіцієнтів пошукової функції, а саме: $C_0 = 0$; $C_1 = 2,4$; $C_{11} = -1,1$; $C_{12} = -0,6$; $C_2 = 12$; $C_{22} = -1,7$; постійній кроку $g = 0,01$; його приростом (за критерієм оптимізації) $d = 0,05$; початковими точками $x_1 = 82$; $x_2 = 45$; $x_3 = 6$ (визначаються, як максимальні значення параметрів режиму сканування (див. п.2.2) та кількістю кроків $k = 100$; а також максимальним та мінімальним значеннями пошукової функції: $\min = -2$, $\max = 2$.

Далі проводиться перевірка умови зупинки роботи функції пошуку оптимізації. Для цього здійснюється почерговий «спуск» по координатам:

$$Gr_1 = C_0 + C_1x_1 + C_{12}x_1 + 2C_{11}x_1; Gr_2 = C_0 + C_2x_2 + C_{12}x_2 + 2C_{22}x_2;$$

$$Gr_3 = C_0 + C_3x_3 + C_{13}x_3 + 2C_{23}x_3,$$

де приріст координат: $x_1 = x_1 + g \cdot Gr_1$; $x_2 = x_2 + g \cdot Gr_2$; $x_3 = x_3 + g \cdot Gr_3$. Пошук оптимального значення функції припиняється у разі виконання умови:

$$\sqrt{Gr_1^2 + Gr_2^2} \leq d.$$

Подальші розрахунки, на прикладі зразку з кремнію a-Si проводилися у програмі написаній на мові програмування математичного процесору “MathLab” і дозволили оптимізувати режими контролю геометричних та механічних характеристик поверхні в залежності від умов проведення дослідження, рис.6.15, табл. 6.3.

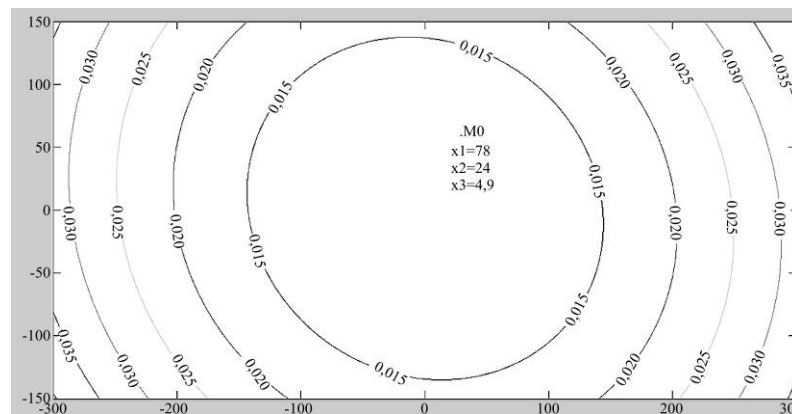


Рисунок 6.15 – Оптимізаційний графік визначення режиму (x_1 – крок сканування; x_2 – швидкість сканування; x_3 – час релаксації) вимірювання топології та механічних хар-к поверхні кремнію a-Si (Мат. процесор “MathLab”)

Таблиця 6.3 – Результати визначення оптимальних режимів контролю геометричних та механічних характеристик для різних матеріалів

Досліджуваний матеріал	Оптимальні режими дослідження			Значення критерію оптимізації, d
	h , нм	V , нм/с	t , мс	
П'єзокераміка системи ЦТС	80	21	5,1	0,025
Кремній a-Si	78	24	4,9	0,015
Оптичне скло типу «крон»	78	22	4,9	0,015
Біокераміка системи CEREC	82	18	6	0,045

За визначених оптимальних режимів проводилося експериментальне дослідження нанорельєфу (рис. 6.16) та механічних характеристик (рис. 6.17) деяких матеріалів [25].

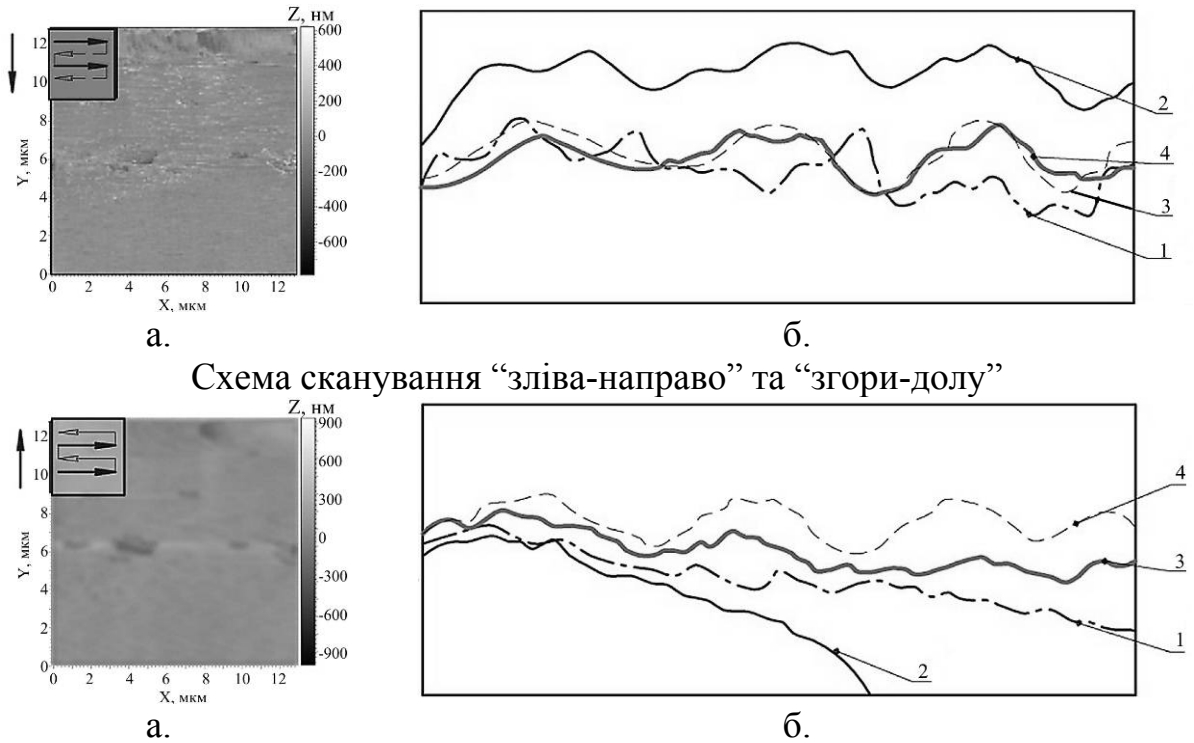


Схема сканування “зліва-направо” та “згори-долу”

Схема сканування “зліва-направо” та “знизу-угору”

Рисунок 6.16 – Топограма (а) та профілограма (б) поверхні кераміки системи ЦТС за режимів проведення дослідження:

- 1 – $V = 18$ нм/с; $h = 78$ нм; $\tau = 4,9$ мс; 2 – $V = 24$ нм/с;
 $h = 82$ нм; $\tau = 6$ мс; 3 (оптимальний) – $V = 21$ нм/с; $h = 80$ нм; $\tau = 5,1$ мс;
 4 – профіль отриманий на електронному мікроскопі “Phoenix G3”

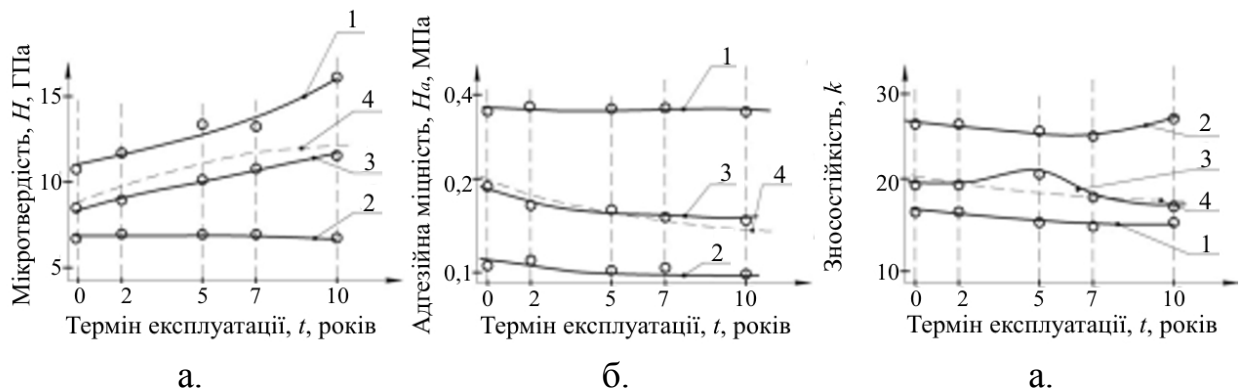


Рисунок 6.17 – Залежність мікротвердості (а), адгезійної міцності (б) та зносостійкості (в) золотого покриття (товщина 20 нм) на полікристалічній кремнієвій (h-Si) підкладинці мікрогіроскопу “SL720” (виробник: “CSM Ltd”) від часу її експлуатації за різних режимів дослідження: 1 – $P_{mтв} = 0,55$ мН; $\tau = 9$ с;

$P_{скл} = 0,6$ мН; 2 – $P_{мтв} = 0,83$ мН; $\tau = 17$ с; $P_{скл} = 0,8$ мН; 3 – $P_{мтв} = 0,15$ мН; $\tau = 11$ с; $P_{скл} = 0,5$ мН; 4 – залежності отримані альтернативними методами (а – мікротвердомір “DuroScan-10/20”; б – адгезіометр “АТ-101”; в – трибометр “FT2”).

Із залежностей наведених на рис.6.16 – 6.17 можна побачити, що визначення мікрогеометрії та механічних характеристик поверхні при оптимальних режимах контролю дозволяє отримувати більш точні та якісні значення нанорельєфу поверхні, а також мікротвердості, адгезійної міцності та зносостійкості. Також встановлено, що найбільш оптимальною схемою сканування є схема “зліва-направо” та “згори-долу”.

Таким чином, вирішення завдання параметричної оптимізації дозволило встановити, що оптимальними режимами контролю геометричних (механічних) характеристик матеріалів з яких виготовляються компоненти МСТ методом АСМ є: крок сканування 78 – 82 нм, швидкість сканування 18 – 24 нм/с та час механічної релаксації 4,9 – 6 мс.

6.3. Прогнозування терміну надійної експлуатації та біосумісності матеріалів методом атомно-силової мікроскопії за різних режимів експлуатації

Прогнозування терміну експлуатації зонду АСМ проводилося за методикою описаною в п.2.4.5 на основі характеристик, що отримані методом АСМ на еталонних зразках (мікронерівності, мікротвердість та інше) [26]. Залежність вимірюваних та інформативних параметрів при цьому відповідала параболічному закону апроксимуючої функції: $\bar{f}(t) = at^2 + bt + c$, де t – час вимірювання; a , b , c – коефіцієнти рівняння регресії, що визначалися з системи рівнянь:

$$a \sum_{i=1}^n t_i^4 + b \sum_{i=1}^n t_i^3 + c \sum_{i=1}^n t_i^2 = \sum_{i=1}^n t_i^2 x_i;$$

$$a \sum_{i=1}^n t_i^3 + b \sum_{i=1}^n t_i^2 + c \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n t_i x_i;$$

$$a \sum_{i=1}^n t_i^2 + b \sum_{i=1}^n t_i + cn = \sum_{i=1}^n x_i,$$

де x_i - значення параметра в i -тий момент часу;

Розв'язавши систему, знаходяться коефіцієнти рівняння регресії:
 $a = 0,33$; $b = -2207,6$; $c = 10000$.

Далі, визначається максимальний приведений час експлуатації за формулою (2.28):

$$t = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a(c - x)}}{2a} = \frac{2207,6 + \sqrt{2207,6^2 - 4 \cdot 0,33 \cdot (10000 - 9600)}}{2 \cdot 0,33} = 6689,52 \text{ с},$$

де $x = 9600$ с – граничне значення параметру; a , b , c – коефіцієнти в рівняннях регресії.

Середньоквадратичне відхилення часу σ знаходиться за формулою (2.31): $\sigma = 1,97$.

Мінімальний граничний час: $t_{\min} = 3300 \cdot 1,97^{1,1} = 6957$ с, де $\gamma = 1,1$ – коефіцієнт Стюдента.

Оскільки випробування проводяться за умов прискореного старіння, коефіцієнт прискорення обчислюється за формулою (2.33):

$$K_t = \exp \left(11600 \cdot X_{ep} \frac{(X_{випр} - X_{екс})}{X_{випр} \cdot X_{екс}} \right) = \exp \left(11600 \cdot 9600 \cdot \frac{(8943 - 8926)}{8943 \cdot 8926} \right) = 1,27,$$

де $X_{ep} = 9600$ с – граничне значення вимірюваної характеристики, виходячи за яке отримане значення перевищить допустиму похибку; $X_{випр} = 8943$ с – вимірювана характеристика, отримана внаслідок еталонного випробування; $X_{екс} = 8926$ с – вимірювана характеристика, отримана внаслідок експлуатації.

Таким чином, мінімальний ресурс зонду з урахуванням прискореного старіння: $t_{pec} = t_{\min} \cdot K_t = 6957 \cdot 1,27 = 8835,4$ с.

За необхідності проведення контрольних вимірювань, визначимо інтервали часу, через які слід проводити такі вимірювання, а також яким по

рахунку є дане вимірювання:

$$\tau = i_{\min} \cdot \frac{t_n}{n} = 1 \cdot \frac{3300}{3} = 1100 \text{ с} = 18 \text{ хв } 20 \text{ с};$$

$$M = n - \frac{n}{i_{\min}} = 3 - \frac{3}{1} = 0.$$

У нашому випадку, "нульове" контрольне вимірювання стану зонду АСМ для його подальшої експлуатації слід проводити не пізніше 18 хв 20 с від початку його експлуатації.

Для експериментального визначення терміну надійної експлуатації пристроїв МСТ, окрім оптимальних значень параметрів сканування та комплексного впливу зовнішніх умов необхідно враховувати фізичні властивості самих матеріалів цих пристроїв, а також вплив на них, як внутрішніх, так і зовнішніх факторів [27]. Це, у більшості випадків, унеможлиблюється складністю та стохастичністю процесів, які впливають на ці матеріали, а також тим фактом, що більшість використовуваних в пристроях МСТ матеріали є композиційними та неоднорідними за своїми властивостями.

В зв'язку з цим, автором дисертаційного дослідження запропонована експериментально-статистична модель, що дозволяє визначити термін надійної експлуатації пристроїв МСТ. Модель полягає у прогнозуванні ступеню деградації стану поверхні компонентів цих пристроїв з часом із залученням автоматизованої системи контролю, яка базується на методі АСМ [27].

В якості приклада застосування розробленої в роботі експериментально-статистичної моделі розглянута модель для дослідження біокераміки системи CEREC, що використовується при виготовленні зондів гастроентеромонітору "ГЭМ-01" (виробник: "Гастроскан-ГЭМ", Росія) для електрогастроентерографії та тривалого вимірювання кислотності (рН-метрії) шлунково-кишкового тракту.

Ще однією характеристикою, притаманною біоматеріалам є їхня

біосумісність з біотканинами організму за механічними властивостями, фізичний зміст якої полягає у здатності матеріалу адаптуватися в живому організмі не викликаючи відторгнення протягом тривалого часу.

В результаті обробки експериментальних даних, були складені та розв'язані рівняння регресії методом планування багатофакторного експерименту (див. п.2.2.3), внаслідок чого одержані наступні залежності:

– залежність часу надійної експлуатації (T , год) від часу деградації біокераміки системи CEREC (x_1 , год) та часу релаксації механічних напружень в ній (x_3 , год), а також від швидкості її травлення (x_2 , год) та механічного стирання поверхні (x_4 , год):

$$T = 3,0487 + 0,27944x_1 + 0,25967x_2 - 1,31617x_3^2 + 0,95512x_4^2;$$

– залежність ступеня біосумісності (C) від механічних властивостей біокераміки, а саме: шорсткості поверхні (x_1 , нм), адгезійної міцності (x_2 , МПа), мікротвердості (x_3 , МПа) та товщини біокерамічного покриття (x_4 , нм):

$$C = 1,99302 + 0,10909x_1^2 - 0,27298x_2^2 + 0,33209x_3^2 - 0,08519x_4.$$

Отримані результати розрахунку за вищенаведеними залежностями дозволили визначити максимальні час надійної експлуатації та ступінь біосумісності за механічними властивостями біокераміки CEREC, рис. 6.18.

Аналіз отриманих залежностей дозволив встановити, що зменшення часу релаксації механічних напружень в біокераміці з одночасним збільшенням часу деградації збільшує значення ступеню біосумісності по часу до 580 – 600 годин, тоді, як зменшення швидкості механічного стирання матеріалу до 0 веде до збільшення ступеня біосумісності по часу до 640 – 700 годин. При цьому швидкість травлення майже не впливає на ступінь біосумісності. В той же час, зменшення шорсткості та збільшення товщини біокерамічного покриття при майже незмінних адгезійній міцності та мікротвердості веде до збільшення ступеня біосумісності по механічним властивостям до 10^9 (для залежності з мікротвердістю) та до 10^4 (для залежності з адгезійною міцністю).

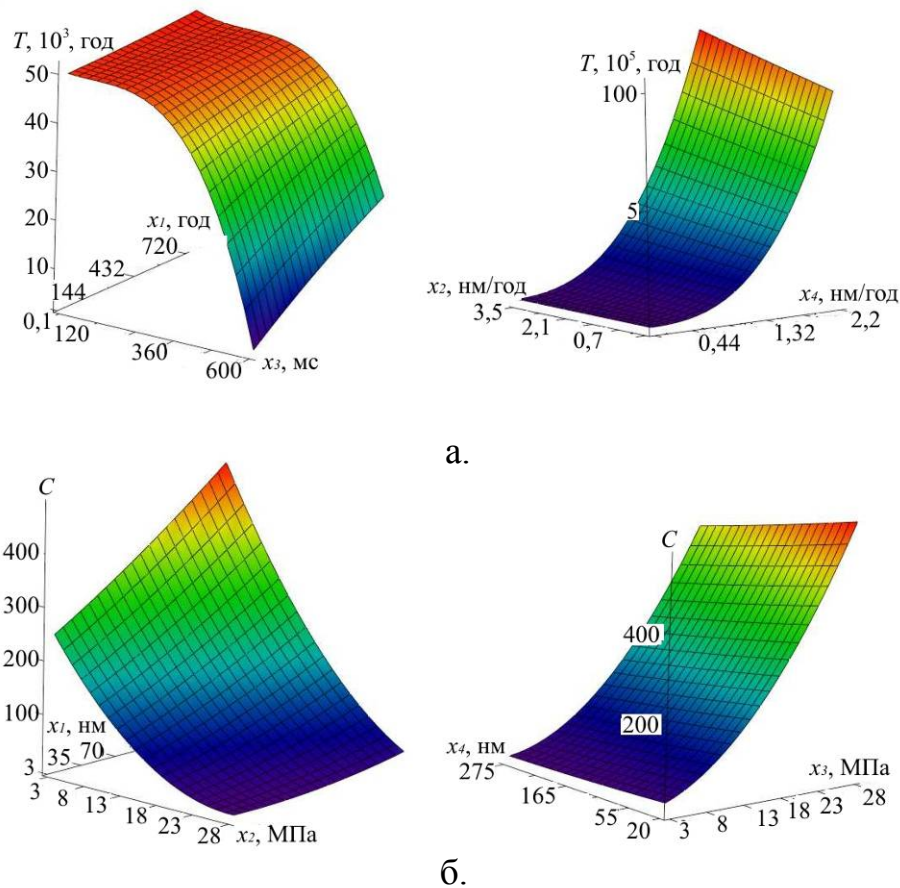


Рисунок 6.18 – Результати експериментального прогнозування часу надійної експлуатації (а) та біосумісності за механічними властивостями (б) біокераміки системи CEREC

Таким чином, результати проведених досліджень дозволили не лише визначити ступінь біосумісності біокераміки системи CEREC з часом, але й спрогнозувати строк служби матеріалу, який визначався за кількістю мікрodefектів, що утворювалися в матеріалі в процесі його експлуатації.

За результатами проведених досліджень та обрахунків отримано графік залежності кількості мікротріщин (k) та мікропор (N) від терміну експлуатації матеріалу, рис. 6.19. З графіків, наведених на рис. 6.19 витікає, що після 5 – 7 років експлуатації для усіх дослідних зразків біокераміки системи CEREC відбувається значне зростання як мікротріщин, так і мікропор. Для оцінки адекватності розробленої моделі на рис. 6.19 (поз.2) показані залежності кількості мікротріщин (k) та мікропор (N) від терміну експлуатації кремнію (a-Si).

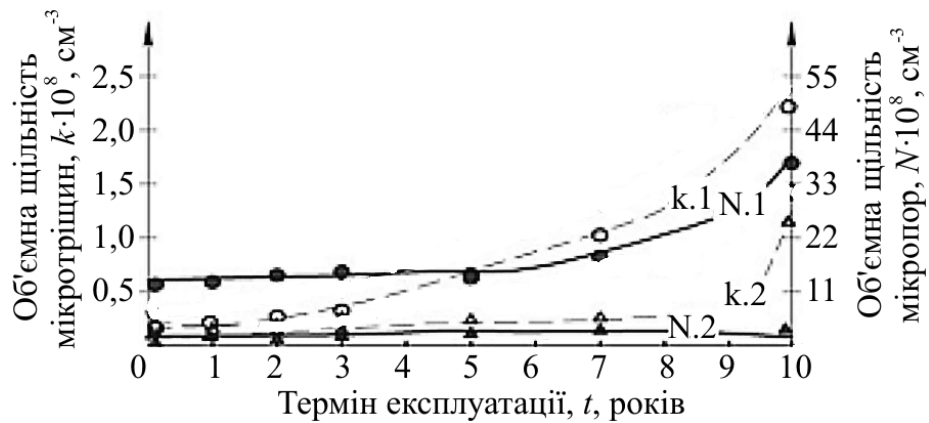


Рисунок 6.19 – Зміна кількості мікротріщин та мікропор з часом:

1 – біокераміка системи CEREC; 2 – кремній a-Si

Так, динаміка зростання мікротріщин та мікропор для кремнію незначна, а суттєве зростання відбувається лише після 8–9 років експлуатації. Це вказує на несуттєвий вплив механічних чинників (згинаючі та крутильні навантаження), що здійснювався на ці матеріали, а також високу хімічну інертність досліджуваного матеріалу.

Експериментально кількість мікротріщин та мікропор визначалася за допомогою методу АСМ: проводилося сканування 10–15 ділянок по поверхні досліджуваного матеріалу. Щільність мікропор та мікротріщин визначалася шляхом аналізу отриманих зображень поверхні в спеціалізованій програмі «FemtoScan v.4.8».

Порівняння розрахункових даних та експериментально отриманих результатів показало високу збіжність результатів. Так, відхилення значень результатів експерименту від розрахункових даних не перевищувало 3,8%.

Паралельно з цими дослідженнями, проводилося дослідження зразків із п'єзоелектричної кераміки системи ЦТС після їх електронно-променевої обробки за різних термінів експлуатації, рис. 6.20 [28] – [30].

При такій електронно-променевої обробці спостерігалось усунення окремих мікро- і нанодфектов (40% мікротріщин шириною до 5 нм та 65% пір), які виникли в процесі осадження струмопровідних покриттів у вакуумі

та при їх тривалій експлуатації (зберіганні). Це дозволило підвищити термін безвідмовної експлуатації таких п'єзоелементів на 25 – 50% [31].

В результаті аналізу топограм та профілограм зразків, представлених в рис. 6.20, показано, що для зразків, які знаходилися в тривалій експлуатації відбувається часткове руйнування та ерозія струмопровідних електродів п'єзоелементів (рис. 6.20.3).

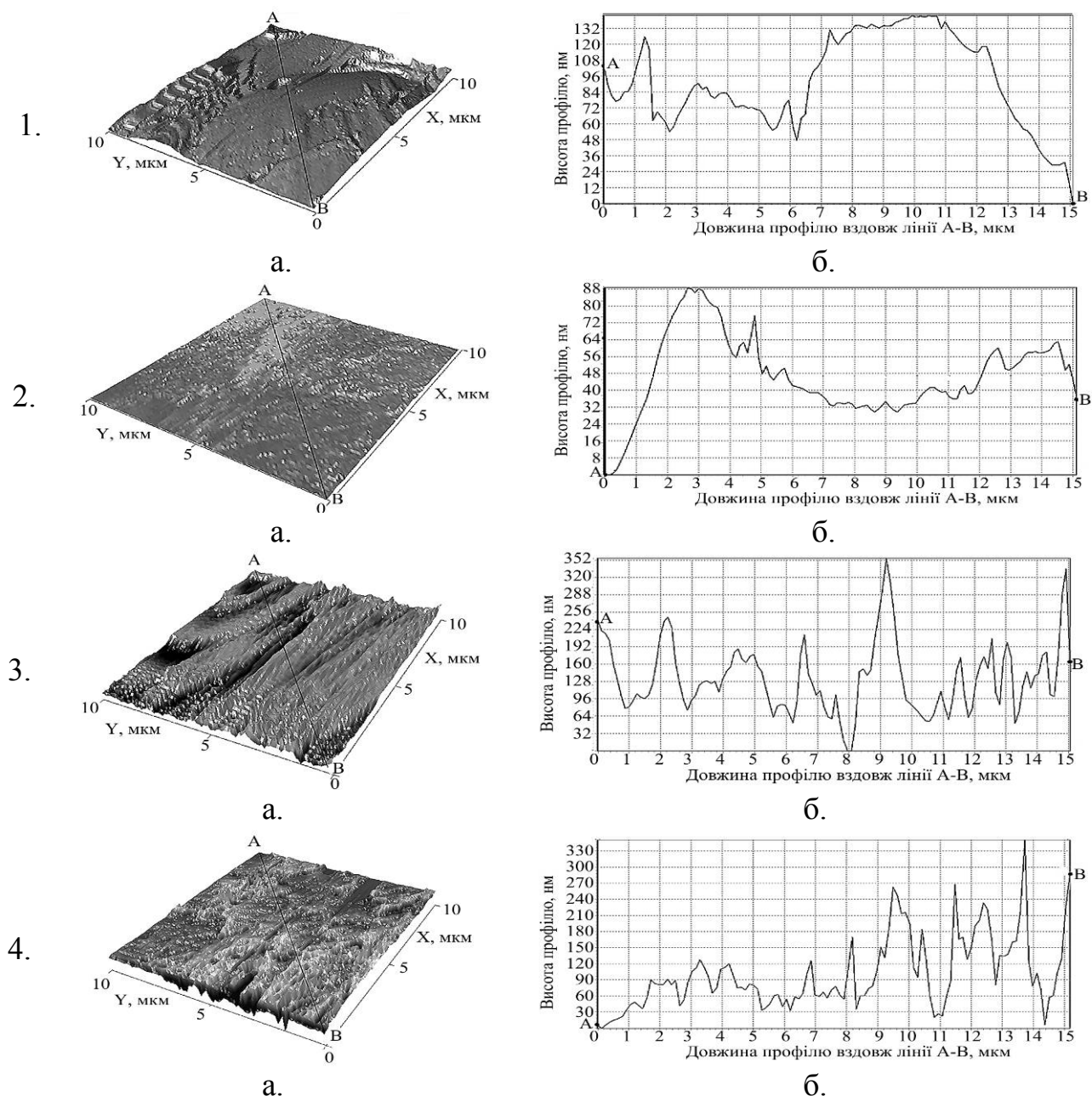


Рисунок 6.20 – Топограма (а) і профіль уздовж лінії А – В ділянки (б) поверхні (13×13 мкм) п'єзокерамічного елемента системи ЦТС, що не був в експлуатації (1, 2) та після 12 років експлуатації (3, 4):

1, 3 – немодифікованого; 2, 4 – модифікованого електронним потоком

При цьому, на відміну від зразків, які в експлуатації не знаходилися (мікронерівності поверхні 120 – 160 нм), для зразків, що експлуатувалися спостерігалось збільшення мікронерівностей до значень 320 – 450 нм, а також поява мікротріщин, відколів та інших мікродефектів поверхні [32], [33].

У той же час, подальша електронна обробка зразків даної групи дозволила частково усунути ряд мікродефектів (рис. 6.20.2). При цьому хімічний склад та нанорельєф поверхонь після їх обробки електронним потоком змінювалися несуттєво [34]. Проте, тривала експлуатація таких п'єзoeлементів, що до електронно-променевого відновлення мали високу кількість мікродефектів, одночасно призводить до різкого зниження резонансного піку з 580 мВ до 220 мВ (у 2,6 раз) АЧХ, розривів в імпульсній характеристиці та появи шумів на перехідній характеристиці, рис. 6.21 [27].

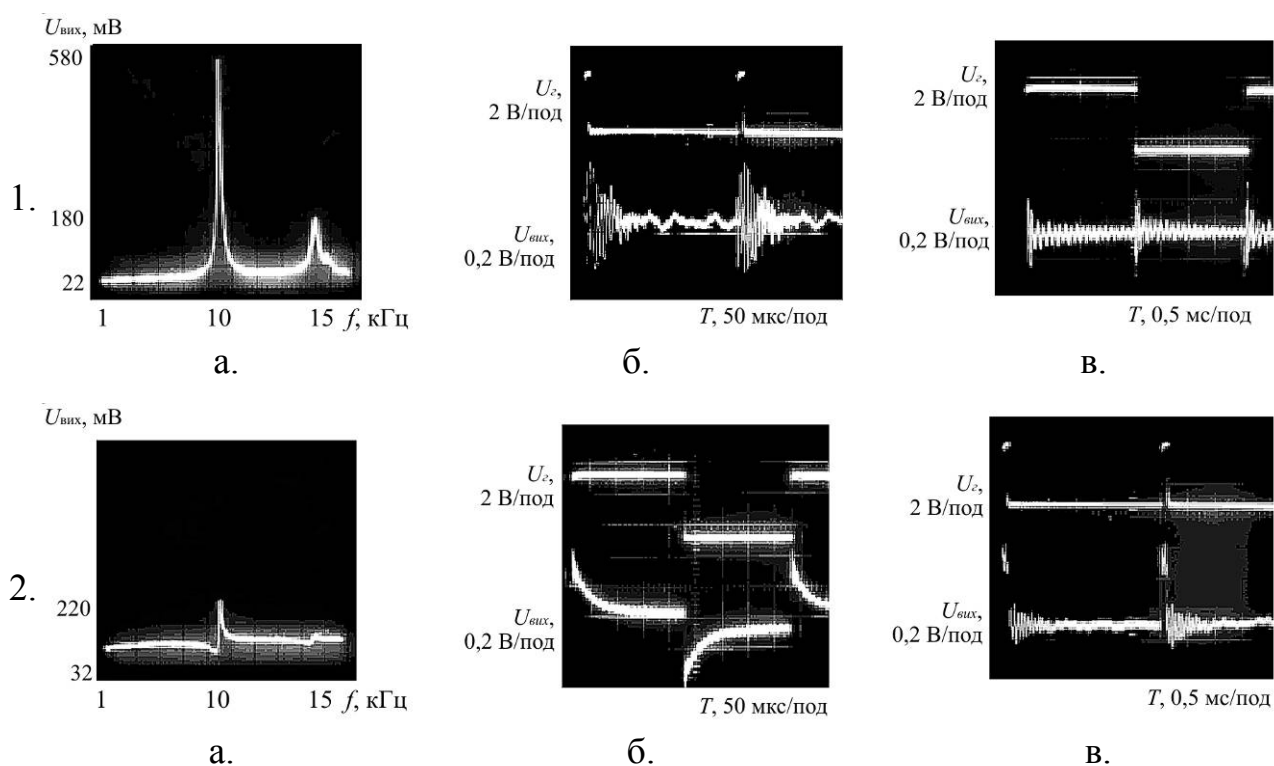


Рисунок 6.21 – Амплітудно-частотна (а), імпульсна (б) та перехідна (в) характеристики п'єзoeлектричного датчика тиску (ЦТС-19, діаметр 10 мм, товщина 0,3 мм) на початку (1) та після 12 років (2) експлуатації.

Прилад: осцилограф “Х1-46”.

Прогнозування терміну експлуатації п'єзоелектричних перетворювачів медичних приладів шляхом планування двохфакторного експерименту заданими, отриманими методом АСМ, дозволило побудувати гістограму залежності кількості п'єзоелектричних перетворювачів, які працюють безвідмовно від часу їх експлуатації, рис. 6.22.

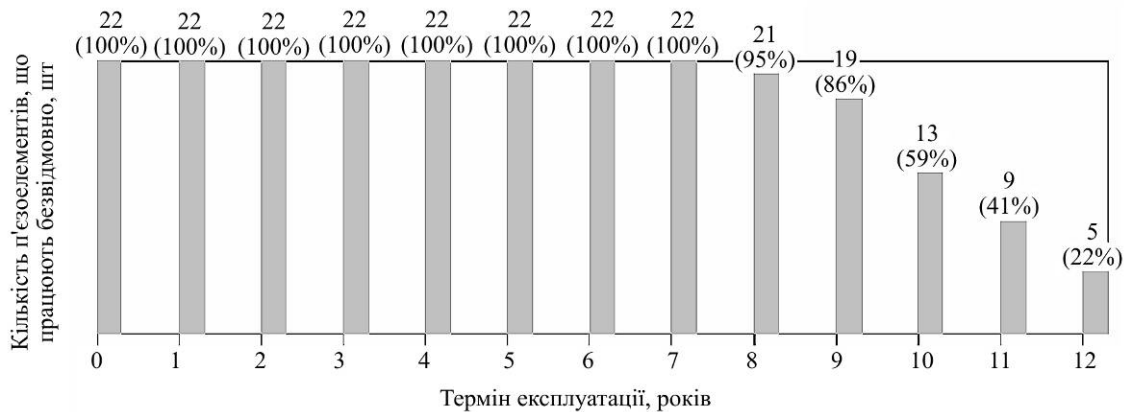


Рисунок 6.22 – Гістограма залежності кількості п'єзоелектричних перетворювачів, що працюють безвідмовно від часу їх експлуатації

Таким чином, показана можливість прогнозування терміну надійної експлуатації, як зонду АСМ, так і досліджуваних зразків, а також біосумісності матеріалів таких зразків методом АСМ при різних режимах дослідження. Визначено час, через який необхідно проводити перше контрольне вимірювання стану зонду АСМ і який становить 18 хв 20 с від початку його експлуатації. Встановлено, що експлуатація, як вимірювального інструменту, так і досліджуваного зразка, з часом веде до зменшення надійності експлуатації таких об'єктів за нелінійним законом.

6.4. Розширення функціональних можливостей автоматизованої системи контролю на базі атомно-силового мікроскопу

Із вищесказаного встановлено, що метод АСМ має унікальні властивості в порівнянні з іншими методами мікроскопії, які в першу чергу роблять його невід'ємним і необхідним інструментом сучасного дослідника.

В першу чергу слід відзначити високу роздільну здатність АСМ, що дозволяє візуалізувати об'єкти розміром від 2 Å. Принципи роботи АСМ роблять його незалежним від електропровідних властивостей об'єктів, що дозволяє досліджувати не тільки провідні поверхні, але й діелектричні.

Загалом, основні функціональні можливості методу АСМ представлені на схемі (рис.6.23), де виділеними є позиції, що були отримані в результаті наукових досліджень проведених в даній дисертаційній роботі.

В той же час, кантилевери АСМ можна використовувати не лише в якості профілометра поверхні, але й як високочутливі датчики для вимірювання різних фізико-хімічних впливів з боку зовнішнього середовища, наприклад, як біосенсиори [35].

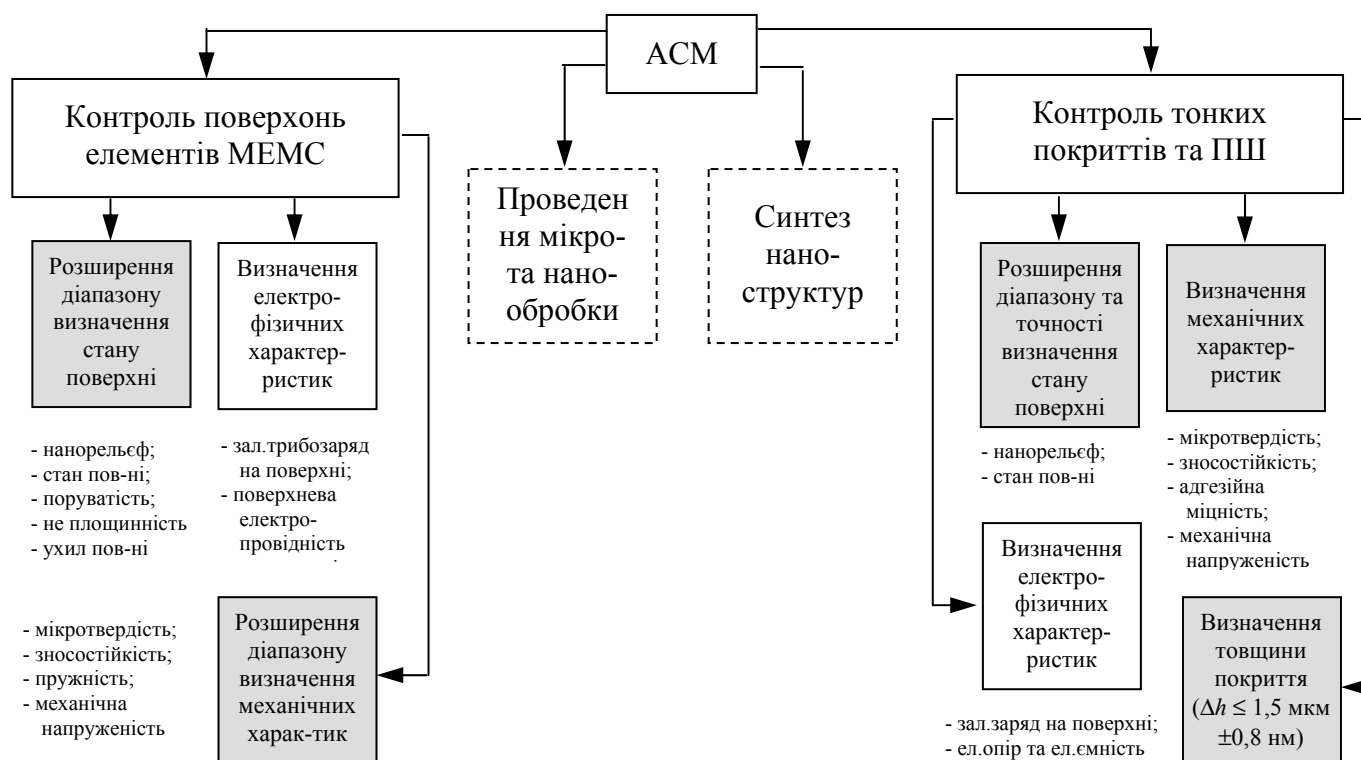


Рисунок 6.23 – Схематичне зображення розвитку функціональних можливостей методу АСМ при застосуванні автоматизованого комплексу для вимірювання нанорельєфу та механічних характеристик компонентів пристроїв МСТ

Принцип дії кантилеверного біосенсора оснований на специфічності однієї з його поверхонь до досліджуваної адсорбованої речовини. На даний

момент на базі консолей створено безліч сенсорів, що мають в своїй основі два принципи реєстрації сигналу, що надходить з рецепторного шару: перший з них зводиться до вимірювання резонансної частоти системи, а другий – до визначення її механічних деформацій. Проте використання результатів досліджень, проведених автором в дисертаційному дослідженні показує можливість створення таких біосенсорів безпосереднім формуванням за технологією "lab-on-chip" кантилеверів на п'єзочипах, створюючи, таким чином, повноцінний вимірювальний інструмент.

Об'єктивним доказом перспективності методу АСМ є орієнтація найбільших виробників приладів для нанометричних вимірювань на випуск приладів з вбудованою можливістю локального анодного окислення (ЛАО) і струмопровідних зондів, а також спеціалізованого програмного забезпечення ("VEECO Instruments", м. Плейнвіль, США; "NT-MDT", м. Москва, Росія).

В даний час проведення експериментів на таких приладах є доступним дослідникам при наявності відповідного апаратного і програмного забезпечення, що випускається серійно. Проте мінімізація розмірів структур, що формуються, як правило, є ноу-хау компаній і вимагає як розуміння особливостей процесів ЛАО, так і специфіки методу АСМ. Крім того, реалізація оригінальних методик ЛАО обмежується можливостями використовуваного комерційного обладнання.

Модифікація окремих ділянок підкладинки здійснюється за допомогою зонду АСМ. Електрохімічний процес оксидування відбувається при наявності на поверхні підкладинки, адсорбованого з навколишнього простору, шару води, а також рідинного меніску на вістрі зонда. Між підкладинкою і зондом утворюється електричне поле, сконцентроване в зазорі субмікронної величини. У разі низької інтенсивності електричного поля, електрохімічна реакція поблизу вістря протікає, в основному, за рахунок емісії зондом електронів

Недоліком ЛАО в контактному режимі сканування є складність мінімізації розмірів структур, що формуються. Виникає електростатична

сила, яка сприяє додатковому притисненню зонду до поверхні, що може призводити до зрізання раніше сформованих ділянок оксиду, а також деградації вістря зонду. Більш перспективним є ЛАО в зоні взаємодії підкладинки і зонду, що здійснює коливання по нормалі до поверхні. Використання зворотного зв'язку по амплітуді дозволяє підтримувати силу взаємодії зонда з поверхнею на тому ж рівні, що і в стандартному режимі сканування.

Геометричні параметри сформованих за допомогою ЛАО структур знаходяться в залежності від форми рідинного меніска і, як наслідок, кута змочування поверхні і вологості середовища [36]. Оскільки діаметр шийки меніску може бути істотно меншим за радіус заокруглення зонду АСМ, можна отримати структури, що мають латеральний розмір порядку декількох нанометрів. Велика ширина “острівців” оксиду, отриманих в динамічному режимі, ймовірно, пов'язана з наявністю на поверхні кремнієвої підкладинки шару оксиду товщиною ~ 2 нм, що утворюється під дією кисню повітря.

З вищесказаного обґрунтована доцільність та закладені теоретичні засади реалізації на базі АСМ сучасного інструментального мікроскопу [37], [38], що дозволить проводити мікро- та нанообробку (мікроскрайбування; наносвердлування, нанолітографію), вводити мікро- та наноін'єкції в біоб'єкти та біореактори, а також проводити синтез наноструктур (вирощування нанотрубок та інших наноструктур; реалізація інструментів типу нановеретено та наноекструзія).

Встановлено, що метод АСМ є найбільш перспективним методом дослідження фізико-механічних та техніко-експлуатаційних характеристик досліджуваних поверхонь [39]. Проте, для кожного окремого дослідження необхідно використовувати спеціальний зонд, який принципово відрізняється від інших. Так, використання зондів, модифікованих вуглецевим покриттям дозволяє досліджувати нанорельєф та механічні властивості різноманітних матеріалів. Між тим, використання даного типу зондів для дослідження, наприклад електромагнітних властивостей, неможливе через конструктивні

особливості їх виготовлення. Таким чином, проблема уніфікації зондів унеможлиблює повноцінне комплексне дослідження матеріалів при використанні лише одного типу зондів.

Тому, автором дисертаційного дослідження пропонується використання матриці зондів, що створені на єдиній підкладинці і мають принципово різне призначення. Така матриця може створюватися на чипі з п'єзоелектричної кераміки в якій методом комбінованої електронної мікрообробки створюються доменно-дисипативні структури, використання яких дозволяє проводити незалежне керування кожним зондом окремо [40], [41]. Таким чином, використання матриці зондів дозволяють досліджувати широкий спектр властивостей матеріалів у точному приладобудуванні в одному циклі вимірювання.

Проте, не дивлячись на явні переваги розглядуваного комплексного дослідження поверхонь із застосуванням матриці зондів, на сьогодні основними перепонами застосування таких матриць є проблема заміни усієї матриці зондів при виході з ладу хоча б одного зонду. Ще однією проблемою є технологічна проблема створення матриці зондів на п'єзокерамічному давачі та підведення кожної контактної групи зондів до модулів обробки відповідної інформації.

6.5. Використання результатів дисертаційного дослідження в промисловості та в навчальному процесі закладів вищої освіти України

Основне призначення та галузі застосування результатів дисертаційного дослідження:

1. Наноелектроніка – комплексний контроль мікрогеометрії та механічних характеристик (мікротвердості, зносостійкості, адгезійної міцності тощо) наноструктур (провідників, електродів, р-п- та п-р-переходів, та інших, габаритними розмірами менше 100 нм) давачів та електронних

компонентів МСТ (давачів та систем управління МСТ, елементів пристроїв збереження оперативної інформації та інше).

2. Інтегральна оптика та мікрооптика – контроль стану, морфології та фізико-механічних характеристик елементів оптико-механічних приладів та лазерних систем (дзеркала, фільтри, пентапризми та інше).
3. Високочастотна радіoeлектроніка – визначення механічних характеристик (мікротвердості, зносостійкості, внутрішніх механічних напружень, тощо) робочих елементів виробів мікросистемної техніки (резонаторів, мікрогенераторів, фільтрів тощо).

Для широкого застосування результатів дисертаційного дослідження в промисловій сфері рекомендується:

1. Проводити вимірювання стану та механічних характеристик компонентів пристроїв МСТ за таких параметрів зовнішніх умов: температурі $T = 20 - 26$ °С, відносній вологості $30\% < \phi < 70\%$, концентрації аміаку в оточуючій атмосфері до $0,036$ мг/м³ та з'єднань сірки – до $0,005$ мг/м³; а також за наступних параметрів сканування: швидкість $V = 18 - 26$ нм/с; крок $h = 78 - 82$ нм; час механічної релаксації $\tau = 4,8 - 6$ мс.

2. Для визначення параметрів мікрогеометрії та механічних характеристик поверхонь матеріалів в одному вимірювальному циклі, використовувати розроблене математично-методичне та апаратно-програмне забезпечення для теоретико-експериментальних досліджень методом АСМ.

3. Використовувати універсальний інструментарій для нанометричних вимірювань, а також автоматизувати процес проведення експериментальних досліджень за допомогою методу АСМ, що з високою точністю, чутливістю, відтворюваністю та надійністю дозволяє проводити комплексне вимірювання та контроль геометричних та механічних характеристик пристроїв МСТ.

Окремі результати дисертаційної роботи були впроваджені у вітчизняну та закордонну промисловість (додаток В), а саме:

– розроблено автоматизовану систему вимірювання і контролю, яка

містить удосконалений блок контролю в частині впровадження систем позиціонування лазерного променя на зонд атомно-силового мікроскопу (патент України на корисну модель №91425) та видалення залишкового трибоелектричного заряду (патент України на корисну модель №91523) – Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України (м.Київ, Україна);

– розроблено комплекс методик для проведення та математичної обробки результатів експериментальних досліджень методом АСМ, який включає стандартні та оригінальні методики вимірювального контролю нанорельєфу та фізико-механічних характеристик поверхонь матеріалів в одному вимірювальному циклі (способи оцінки мікротвердості та зносостійкості захищені патентами України на корисну модель №87907, №117635), формування панорамних зображень досліджуваної ділянки з високою роздільною здатністю та деталізацією фрагментів її топології – ТОВ «Мелітек-Україна», (м.Київ, Україна);

– створено алгоритм та програмно реалізовано узагальнену математичну модель, що дозволяє оцінити силову взаємодію та теплообмін між різними елементами блоку контролю АСМ на різних відстанях між зондом та поверхнею та визначити робочі, граничні та критичні параметри процесу контролю – ДП НВК «Фотоприлад» (м.Черкаси, Україна).

– розроблено і програмно реалізовано комплексний метод математичної обробки результатів визначення нанорельєфу та фізико-механічних характеристик компонентів МСТ, що дозволяє мінімізувати артефакти сканування, уніфікувати інформацію про стан поверхні та проводити обмін з іншими інформаційно-аналітичними системами математичної обробки результатів досліджень АСМ і який покладено в основу створення віртуальної лабораторії нанометричних випробувань – ПАТ «Укрп'єзо», (м.Черкаси, Україна);

– запропоновано технологію виготовлення універсальних зондів АСМ та тест-решіток, а також отримано та апробовано зразки таких зондів для

високоточного нанометричного комплексного контролю нанорельєфу та фізико-механічних характеристик поверхонь компонентів пристроїв МСТ методом АСМ в одному вимірювальному циклі – ТДВ “Микротестмашины” (м.Гомель, Білорусь);

– обчислювальні алгоритми та пакет програм для дослідження мікрорельєфу, структури, фізико-механічних характеристик, а також визначення ресурсу роботи зондів АСМ і зниження інструментальної похибки – Інститут тепло- і масообміну ім. А.В.Ликова (м. Мінськ, Білорусь).

В навчальний процес закладів вищої освіти України були впроваджені такі результати дисертаційної роботи:

– методологічні основи проведення контролю нанометричних об’єктів та структур; методики по визначенню наногеомерії, мікротвердості та зносостійкості матеріалів; пакет програм для дослідження мікрорельєфу, стану поверхні, механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки, а також для встановлення метрологічного ресурсу роботи зондів атомно-силових мікроскопів та зниження їх інструментальної похибки тощо;

– механізм взаємодії зондів АСМ з поверхнями матеріалів в реальних умовах, в якому враховані силові та енергетичні параметри;

– методологія проведення теоретичних та експериментальних досліджень, яка включає: сучасні методи фізико-хімічних досліджень; методи математичного моделювання та чисельно-аналітичні методи задач оптимізації; випробувальний стенд, що призначений для визначення в реальних та екстремальних умовах параметрів мікрогеомерії та фізико-механічних характеристик матеріалів;

– практичні рекомендації щодо високоточного, надійного і оперативного діагностування стану, морфології та фізико-технічні характеристики поверхонь перспективних матеріалів та визначення терміну надійної експлуатації цих матеріалів;

– багатокритеріальна експериментально-статистична модель комплексного впливу зовнішніх умов та параметрів сканування на точність і

надійність результатів дослідження стану, морфології, фізико-механічних характеристик матеріалів для визначення терміну їх надійної експлуатації шляхом прогнозування ступеня деградації цих матеріалів з часом.

Основні теоретичні та практичні аспекти роботи використовуються в навчальному процесі при читанні лекцій, проведенні лабораторних та практичних занять, виконанні курсових та дипломних проектів з курсів “Наноматеріали та покриття у приладобудуванні”, “Теорія та практика експериментальних досліджень”, “Основи метрології та інформаційно-вимірювальної техніки”, “Нанотехнології в медичному приладобудуванні”, “Методи підвищення метрологічних характеристик приладів контролю та визначення складу речовини”, “Інтелектуальні технології вимірювання”, “Технічні засоби для дослідження впливу кліматичних факторів” та інші у НТУУ “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, а також у Черкаському державному технологічному університеті (підтверджено актами впровадження в навчальний процес).

6.6. Висновки до розділу

Таким чином, провівши аналіз результатів експериментальних випробувань з результатами отриманими при використанні базового методу АСМ автором вирішена важлива наукова проблема удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки.

В результаті проведених досліджень отримані наступні результати:

- використання автоматизованої системи контролю на базі АСМ дозволяє мінімізувати кількість артефактів на поверхні АСМ-зображення компонентів МСТ, визначати з високою точністю (відносна похибка вимірювання не перевищувала 4,5%) і якістю висоту нанорельєфу та

товщину нанесеного покриття, а також розширити діапазон вимірювань мікронерівностей у вертикальній площині з 2 – 3 мкм до 4,5 – 6 мкм;

- встановлена можливість діагностування мікропор та інших мікроефектів на поверхні компонентів МСТ за допомогою аналізу результатів їх морфології, отриманих методом АСМ. Показано, що методом АСМ можна визначити щільність мікроефектів мінімальних розмірів від 0,05 мкм з точністю у 1,5 – 2,3 рази вищою ніж методом РЕМ;

- встановлено зменшення кількості випадків виведення з ладу пристроїв мікросистемної техніки у 2,1 – 2,8 рази; збільшення терміну експлуатації зондів АСМ у 2,6 – 3,5 рази; зменшення часу проведення процедури контролю на 30 – 50%; зменшення браку вихідної продукції, що дозволило отримати економічний ефект у 200 тис. грн.;

- експериментально визначено, що після 5 – 7 років експлуатації на дослідних зразках з біокераміки системи CEREC відбувається зростання як кількості мікротріщин, так і мікропор, тоді як для кремнію, динаміка зростання мікроефектів за цей же час є незначною (суттєве зростання мікроефектів відбувається лише після 8 – 9 років експлуатації);

- показано, що зменшення часу релаксації механічних напружень в біокераміці з одночасним збільшенням часу деградації збільшує значення ступеню біосумісності по часу до 580 – 600 годин, тоді, як зменшення швидкості механічного стирання матеріалу до 0 веде до збільшення ступеня біосумісності по часу до 640 – 700 годин;

- визначено, що зменшення шорсткості поверхні та збільшення товщини біокерамічного покриття при майже незмінних адгезійній міцності та мікротвердості веде до збільшення ступеня біосумісності.

Основні результати дисертаційної роботи знайшли практичне застосування на вітчизняних (ІНМ ім.В.М.Бакуля НАН України (м.Київ, Україна), ТОВ «Мелітек-Україна» (м.Київ, Україна), ДП НПК «Фотоприлад» (м.Черкаси), ПАТ «Укрп'єзо» (м.Черкаси), Черкаський державний технологічний університет, Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”) та закордонних (ТДВ “Микротестмашины” (м. Гомель, Білорусь), Інститут тепло- і масообміну ім. А.В.Ликова (м. Мінськ, Білорусь), підприємствах та організаціях, що спеціалізуються в галузях точного приладобудування, мікросистемної та робототехніки, авіакосмічної техніки, а також проводять наукові та метрологічні дослідження в областях нанотехнологій, медицини тощо).

Список використаних джерел:

1. В. М. Шарапов, А. М. Гуржій, М. О. Бондаренко, та Ю. Ю. Бондаренко, "Исследование характеристик токопроводящих электропроводных пьезокерамических элементов", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, спецвыпуск, с. 255-257, 2007.
2. Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко, И. А. Рева, В. А. Ващенко та ін., "Дослідження впливу морської води на мікрогеометрію поверхні металевих покриттів на оптичному склі К8", *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, Вип. 20, с. 222-225, 2010.
3. М. О. Бондаренко, О. В. Котляр, Н. І. Божко, та Г. В. Канашевич, "Мікрогеометрія плівкових композиційних матеріалів на основі CuO - $\text{BaO-La}_2\text{O}_3$ ", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №2, с. 55-58, 2009.
4. Г. Н. Дубровская, Ю. І. Коваленко, Г. В. Канашевич, та М. О. Бондаренко, "Изучение поверхности наноструктурных покрытий нитрида и карбонитрида титана, полученных газофазным осаждением и ионно-лучевой обработкой", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №2, с.56-60, 2006.

5. M. Bondarenko, et al. "Features of study of thin oxide coverages on the elements of microoptics and nanoelectronics by the method of atomic-force microscopy", in Proc. *IX int. scient. conf. "Electronics and Applied Physics"*, Kyiv, 2013, pp. 54-55.
6. Г. Н. Дубровская, М. А. Бондаренко, та А. В. Котляр, "Изучение микрогеометрии и топографии поверхности тонких покрытий методом атомно-силовой микроскопии", на *VII Междунар. науч.-техн. конф. Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия*, Минск, 2006, с. 176-177.
7. Г. Н. Дубровская, А. В. Котляр, Н. И. Божко, П. И. Куриленко, М. А. Бондаренко и др., "Особенности топографии поверхности тонких оксидных покрытий на стекле после электронно-лучевой обработки", на *XXII Рос. конф. Растровая электронная микроскопия ЭМ'2008*, Москва, 2008, с. 129.
8. С. Ан. Клименко, С. А. Клименко, М. О. Бондаренко, та В. С. Антонюк, "Дослідження топографії контактних поверхонь інструментів із ПНТМ на основі КНБ", *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №2 (73), с. 51-58, 2015.
9. Г. В. Канашевич, Г. М. Дубровська, та М. О. Бондаренко, "Використання атомно-силової мікроскопії для дослідження оптичних поверхонь після електронної обробки", на *VI наук.-техн. конф. Приладобудування 2007: стан і перспективи*, Київ, 2007, с. 105-106.
10. В. С. Антонюк, С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко и др., "Особенности измерения микротвердости диэлектрических поверхностей кремниевым зондом атомно-силового микроскопа", *Наноинженерия*, №3 (33), с. 13-16, 2014.
11. Ю. И. Коваленко, М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, и И. А. Рева, "Измерение микротвердости тонких оксидных покрытий на оптических

- диэлектриках методом атомно-силовой микроскопии", на *XXV Рос. конф. Электронная микроскопия*, Москва, 2014, Т. 1, с. 308-309.
12. С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко, В. А. Андриенко, и В. С. Антонюк, "Исследование микротвердости тонких пленок методом наноинден-тирования с помощью атомно-силовой микроскопии", на *XIII междунар. научно-практ. конф. Качество, стандартизация, контроль: теория и практика*, Киев, 2013, с. 20-21.
 13. М. А. Бондаренко, С. А. Шелестовская, Ю. Ю. Бондаренко, М. П. Рудь и др., "Влияние микротвердости исследуемого материала на эксплуатационную пригодность зондов для атомно-силовой микроскопии", на *XIX междунар. конф. Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики*, Киев, 2011, с. 192-193.
 14. С. А. Шелестовская, М. А. Бондаренко, В. А. Ващенко и др., "Формирование упорядоченных наноструктур на пьезоэлектрической керамики системой ЦТС термическим осаждением в вакууме", на *X юбил. междунар. конф. Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях*, Киев, 2010, с. 159-160.
 15. Электронный справочник: Микротвердость, 2015. [Online]. Available: http://www.chemport.ru/data/tables_alphaindex.php?parameter=154. Accessed on: May 30, 2015.
 16. T. C. Chou et al., "Microstructures and mechanical properties of thin films of aluminum oxide", *Scripta Met.*, V. 25, iss. 10, p. 2203-2208, 1991.
 17. С. В. Чернобук, М. И. Чередник, и А. Ю. Попов, "Структура и механические свойства гафния легированного оксидом иттрия", *Журнал нано- та електронної фізики*, Т. 96, № 1, с. 01031-1 – 01035-5, 2017.
 18. Д. И. Бринкевич, Н. В. Вабищевич, С. А. Вабищевич, А. Н. Петлицкий и др., "Упрочнение кремния вблизи границы раздела SiO₂/Si", на *V*

- Международ. науч. конф. Материалы и структуры современной электроники*, Минск, Беларусь, 2012, с.18-21.
19. Г. Н. Дубровская, В. А. Ващенко, М. А. Бондаренко, А. В. Котляр и др., "Исследование структуры и состава резистивных пленок методом АСМ", на *XXI Рос. конф. Электронная микроскопия ЭМ'2006*, Москва, 2006, с. 129-130.
 20. Каталог TUNGALOY 2014: Металлорежущий инструмент и инструментальная оснастка. С.15-43. 2015. [Online]. Available: <http://lab2u.ru/spravochnaia-tablitca-sravneniia-tverdosti-sravnitelnye-dannye-po-tverdosti-po-brinelliu-vickersu-rokvellu-shoru-priblizitelnaia-prochnost-na-razryv-istochnik-ia-katalog-tungaloy-2014-metallorezhushchii-instrument-str-15-43-0931-lab2u.html>. Accessed on: May 30, 2015.
 21. М. А. Бондаренко, А. В. Котляр, Г. В. Канашевич, Н. И. Божко и др., "Исследование состояния поверхностей электродов пьезокерамических элементов", на *XXIII Рос. конф. Электронная микроскопия ЭМ'2009*, Москва, 2009, с. 100.
 22. B. Cappella et al., "Force-distance curves by atomic force microscopy", *Surf. Sci. Rep.*, V. 34, pp. 5-104, 1999.
 23. С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко, и Ю. Ю. Бондаренко, "Определение адгезионной прочности тонких оксидных покрытий на диэлектрических материалах методом атомно-силовой микроскопии", на *IV междунар. научн. конф. Наноразмерные системы: строение, свойства, технологии НАНСИС-2013*, Киев, 2013, с. 369.
 24. С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко, и Ю. Ю. Бондаренко, "Определение адгезионной прочности тонких оксидных покрытий на диэлектрических материалах методом атомно-силовой микроскопии", *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, Т. 12, № 2, с. 295-302, 2014.
 25. М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, та В. О. Андрієнко, "Корегування точності вимірювання методом атомно-силової мікроскопії нанорозмірних структур утворених на поверхнях функціональних

- матеріалів", на *XIII міжнар. наук.-техн. конф. Приладобудування: стан і перспективи*, Київ, 2014, с. 83-84.
26. Ю. Ю. Бондаренко, М. О. Бондаренко, С. О. Білокінь, та В. О. Андрієнко, "Підвищення терміну експлуатації зондів атомно-силового мікроскопу", на *VII міжнар. наук.-практ. конф. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2017)*, Чернігів, 2017, с. 97-99.
 27. М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, А. К. Бабаєв, И. В. Яценко и др., "Применение метода атомно-силовой микроскопии в прогнозировании срока эксплуатации пьезоэлектрических преобразователей медицинских приборов", на *VII Междунар. сем. Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии*, Минск, 2006, с. 143-147.
 28. Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко, І. В. Яценко та ін., "Модифікація нанорельєфу на оптичному склі електронно-променевою мікрообробкою", *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*, №1, с. 104-107, 2012.
 29. М. О. Бондаренко, "Дослідження впливу низькоенергетичного електронного потоку на мікрогеометрію поверхонь п'єзокерамічних елементів", *Труды Одесского политехнического университета*, Вып. 2(32), с. 149-153, 2009.
 30. Y. I. Kovalenko et al., "Study of ordered oxide patterns got on the dielectric surfaces with the combined electronic technology" , in *Proc. XIV Int. conf. "Physics and technology of thin films and nanosystems"*, Ivano-Frankivsk, 2013, pp. 92.
 31. Ю. И. Коваленко, И. А. Рева, В. А. Андриенко, И. В. Яценко, Ю. Ю. Бондаренко, М. А. Бондаренко и др., "Особенности строения оксидных покрытий на оптических диэлектриках после их электронно-лучевой микрообработки", на *XVIII Рос. конф. Растровая электронная микроскопия и аналитические методы исследования твёрдых тел РЭМ-2013*, Москва, 2013, с. 298-299.

32. М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, Г. В. Канашевич, И. В. Яценко и др., "Исследование поверхностей пьезокерамических элементов, модифицир. электронным потоком методом атомно-силовой микроскопии", на *VIII Междунар. сем. Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии*, Минск, 2008, с. 23-26.
33. М. А. Бондаренко, А. В. Котляр, П. В. Петлеваный, и Ю. Ю. Бондаренко, "Исследование поверхностей ультратонких серебряных электродов, сформированных на пьезоэлектрических керамиках системы ЦТС", на *XXX междунар. конф. Композиционные материалы в промышленности*, Киев, 2010, с. 509-511
34. Т. І. Бутенко, М. О. Бондаренко, О. В. Котляр, та Д. В. Бутенко, "Мас-спектрометричний контроль якості покриттів Al, Cu, Cr на діелектричних підкладках", на *IV Міжнар. наук.-техн. конф. Датчики, прилади та системи – 2008*, Черкаси, 2008, с. 153-154.
35. В. С. Антонюк, П. О. Фіалковський, М. О. Бондаренко, та М. В. Філіппова, "Дослідження характеристик біологічних об'єктів методами атомно-силової та растрової електронної мікроскопії", *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія: приладобудування, Вип.47 (1), с. 145-149, 2014.
36. С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко, та В. С. Антонюк, "Керування змочуваністю зондів атомно-силового мікроскопу для біологічних досліджень", на *XIII міжнар. наук.-техн. конф. Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів*, Кременчук, 2014, с. 89-90.
37. М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко, та В. С. Антонюк, "Перспективи використання методу атомно-силової мікроскопії для дослідження стану та фізико-механічних характеристик поверхонь виробів прецизійного машинобудування", *Вісник національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні, № 822, с. 72-77, 2015.

38. М. О. Бондаренко, та Ю. Ю. Бондаренко, "Перспективи використання методу атомно-силової мікроскопії для дослідження стану та фізико-механічних характеристик поверхонь виробів прецизійного машинобудування", на *III Всеукр. наук.-техн. конф. Прогресивні технології в машинобудуванні*, Львів, 2015, с. 20-22.
39. В. С. Антонюк, Ю. Ю. Бондаренко, М. О. Бондаренко, С. О. Білокінь та ін., "Перспективи використання методу атомно-силової мікроскопії при комплексному контролі елементів приладів точного приладобудування", *Перспективні технології та прилади*, Вип. 5, с. 5-9, 2014.
40. М. О. Бондаренко, "Вивчення умов формування впорядкованих доменно-дисипативних структур в п'єзоелектричній кераміці методом комбінованої електронної мікробробки", на *II Всеукр. конф. молодих вчених Сучасне матеріалознавство: матеріали та технології СММТ-2011*, Київ, 2011, с. 11.
41. Ю. Ю. Бондаренко, Д. В. Тележинський, С. О. Білокінь, В. О. Андрієнко, та М. О. Бондаренко, "Формування функціональних зон з різними електромеханічними властивостями в елементах з п'єзокераміки", на *XVII Міжнар. наук.-техн. конф. Приладобудування: стан і перспективи*, Київ, 2017, с. 76-77.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена нова науково-технічна проблема удосконалення існуючих та створення нових методів і засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки шляхом застосування автоматизованих систем вимірювання і контролю цих характеристик з урахуванням дії дестабілізуючих факторів, розроблення математичних та експериментально-статистичних моделей, що в цілому представляє собою наукові основи керування якістю процесу контролю та має практичне значення для галузей мікросистемного та оптико-електромеханічного приладобудування з подальшим їх впровадженням у виробництво, що повністю відповідає поставленій меті.

При виконанні дисертаційної роботи отримані такі наукові результати:

1. Вперше на базі сформульованих теоретичних положень, отриманих закономірностей, розроблених моделей та програмно-апаратних засобів автоматизації процесу контролю, що підтверджені експериментальними дослідженнями, створена наукова методологія удосконалення методів та засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки, що дозволяє покращити точність, підвищити чутливість та відтворюваність результатів контролю з урахуванням дії дестабілізуючих факторів.

2. Розроблено уточнені математичні моделі взаємодії зондів приладів атомно-силової мікроскопії з поверхнями матеріалів на підготовчій, завершальній стадіях та стадії сканування поверхні, шляхом врахування силових та енергетичних складових процесів, що дозволяє встановити лімітуючі фактори такої взаємодії (сили електростатичної, капілярної взаємодії та дисипацію тепла в зоні фізичного контакту зонду з поверхнею), а також з більшою точністю та відтворюваністю (відносна похибка

зменшується на 2 – 3,5%, а коефіцієнт варіації – на 2 – 2,4%) визначити діапазони зміни параметрів, що забезпечує стабільну роботу приладів атомно-силової мікроскопії: час механічної релаксації $(4,8 - 6) \cdot 10^{-3}$ с), швидкість (18 – 26 нм/с) та крок (78 – 82 нм) сканування.

3. Розроблено нові експериментально-статистичні моделі для оцінювання впливу кліматичних факторів та робочих параметрів атомно-силової мікроскопії при застосуванні та довготривалому зберіганні зонду на процес неруйнівного контролю, що дозволяють встановити раціональні діапазони їх зміни: температури (293 К – 299 К), відносної вологості (30% – 70%), концентрації аміаку (до 0,036 мг/м³) та з'єднань сірки в оточуючій атмосфері (до 0,005 мг/м³), часу механічної релаксації $(4,5 - 6,6) \cdot 10^{-3}$ с), швидкості (18 – 45 нм/с) та кроку сканування (78 – 85 нм).

4. Встановлені нові закономірності впливу кліматичних факторів на результати контролю геометричних і механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки:

- дотримання температури в зоні вимірювання на рівні 293 К – 299 К і відносної вологості оточуючого середовища в діапазоні значень 30 – 70% зменшує відносну похибку на 8 – 11% та відтворюваність результатів дослідження у 2,1 – 2,4 рази;
- зменшення концентрації аміаку в оточуючій атмосфері до 0,036 мг/м³ та з'єднань сірки до 0,005 мг/м³, що дозволяє уникнути корозії срібного покриття системи електродів п'єзочипу та дзеркала системи позиціонування атомно-силового мікроскопу, чим підвищує чутливість методу на 17 – 19%.

5. Вперше визначені діапазони зміни робочих параметрів методу атомно-силової мікроскопії, в межах яких зменшується швидкість корозії поверхні зонду в 1,2 – 3,4 рази, чим підвищується термін його експлуатації у 2,6 – 3,5 рази та ймовірність безвідмовної роботи – на 5 – 10%.

6. Встановлено, що застосування комбінованого електронно-променевого модифікування поверхонь зондів приладів атомно-силової мікроскопії покращує їх експлуатаційні характеристики (мікротвердість,

зносостійкість, механічну, хімічну та біологічну стійкість до зовнішніх дестабілізуючих факторів тощо), що дозволяє підвищити ймовірність безвідмовної роботи зондів на 5 – 11% та термін їх експлуатації у 2,6 – 3,5 рази з урахуванням дії дестабілізуючих факторів.

7. Розроблено новий метод підвищення точності, чутливості та відтворюваності процесу неруйнівного контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки на базі розробленого інструментального та програмно-апаратного забезпечення для автоматизації проведення контролю з урахуванням дії дестабілізуючих факторів, застосування якого дозволяє:

- проводити вимірювання і контроль характеристик об'єктів дослідження з похибкою 2,7 – 5,4% та ймовірністю безвідмовної роботи зондів 0,95 – 0,98 шляхом застосування зондів атомно-силових мікроскопів та тест-об'єктів, модифікованих з використанням електронно-променевої мікрообробки;
- керувати робочими параметрами в процесі контролю шляхом застосування систем позиціонування лазерного променя на зонд атомно-силового мікроскопу та видалення залишкового трибоелектричного заряду;
- розширити межі досліджуваної ділянки поверхні (у вертикальній площині в 1,5 – 2,25 рази) та збільшити її деталізацію в 1,6 – 2,1 рази.

8. Отримані наукові результати знайшли застосування на підприємствах України та Республіки Білорусь (підтверджено актами впровадження), що дозволило: зменшити відносну похибку вимірювання у 1,5 – 2 рази; зменшити час проведення контролю геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки в 1,3 – 1,5 рази, збільшити відтворюваність результатів дослідження – у 2,4 рази, термін експлуатації зондів – до 3,5 разів та ймовірність безвідмовної роботи зонду на 5 – 10%, отримати економічний ефект 200 тис. грн. Окремі результати дисертації впроваджені у навчальний процес Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського” та Черкаського державного технологічного університету.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А.

Загальна методика проведення теоретичних та експериментальних досліджень



ДОДАТОК Б

Технологічні аспекти виготовлення інструментарію для проведення нанометричних вимірювань і контролю

Традиційно, основні елементи системи контролю АСМ виготовляються із наступних функціональних матеріалів: чутливий п'єзочип виготовляється з п'єзоелектричної кераміки ZTC (аналог вітчизняної кераміки системи ЦТС), консоль – із золотої фольги або із кремнію з покриттям золотом або його з'єднань, а зонд – із кремнію (для вивчення топології поверхні) або алмазу (для вимірювання мікротвердості та зносостійкості поверхонь). На сьогоднішній день найбільш розповсюдженим матеріалом для зондів АСМ є кремній. Але основною проблемою невисокої продуктивності таких зондів залишається руйнування (притуплення) його вістря з часом при контактному дослідженні поверхонь матеріалів.

Тому, при виготовленні зондів для нанометричних досліджень методом АСМ автором пропонується виготовляти такі зонди за технологією, що є принципово новою і яка включає такі етапи, рис.Б.1: виготовлення матриці консолей із матеріалу заданої жорсткості методом комбінованого електронно-променевого різання з подальшим конденсаторним приварюванням консолі до п'єзоелектричного чипу і кріплення на нього вольфрамового дроту заготовки зонду. Далі проводиться електрохімічне травлення заготовки зонду до необхідної товщини та радіусу закруглення з перевіркою якості виготовлення зондів за еталонними тест-решітками.

При цьому, основними характеристиками продуктивності такого універсального зонду для контролю геометричних та механічних характеристик матеріалів є:

- твердість матеріалу, із якого виготовлено зонд має бути більшою за твердість матеріалів, механічні властивості яких досліджуються;
- масивна основа зонда, що гарантує стабільну роботу системи контролю та надійність отримуваних результатів;

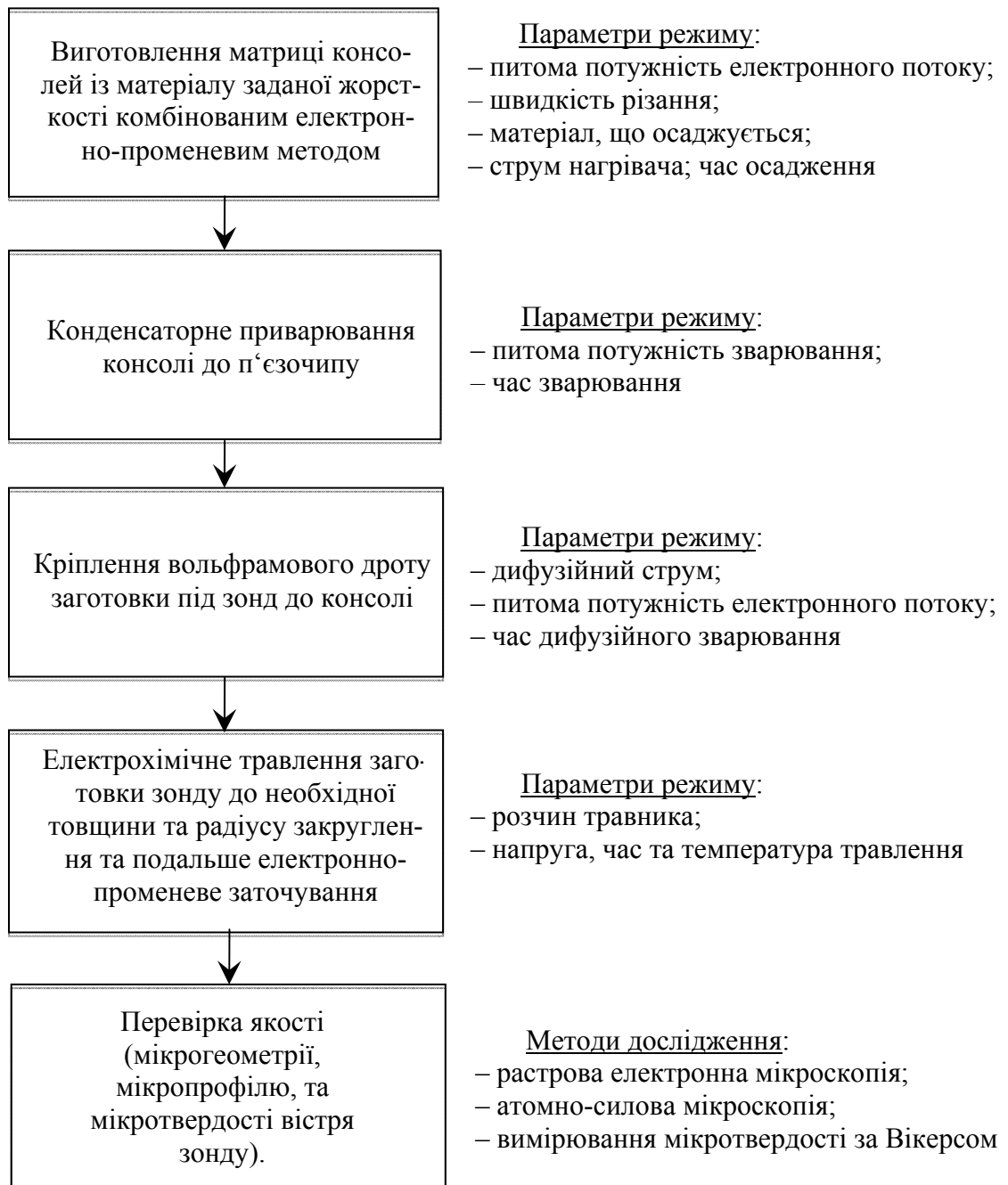


Рисунок Б.1 – Технологічна схема (схема 1) виготовлення зонду для АСМ

– гострота вістря зонда: чим меншим є радіус вістря зонду, тим більша точність та чутливість системи контролю, при цьому недоліками таких зондів є швидка зношуваність та поява артефактів форми зонду при дослідженні рельєфів з вертикальними стінками; великий радіус вістря веде до зменшення точності контролю, а також появою ефекту “залипання” зонду до поверхні.

Розглянемо основні етапи технологічного процесу виготовлення універсального зонду для АСМ.

Виготовлення матриці консолей. На сьогодні, основними матеріалами, які використовуються при виготовленні консолей для АСМ є кремній. Розглянемо особливості поведінки кремнію у вакуумі при обробці електронним потоком.

Враховуючи той факт, що кремній є досить крихким матеріалом, який реагує на високі температурні градієнти в процесі інтенсивного нагріву і охолодження, для уникнення руйнації кремнієвих пластин внаслідок дії на них електронного потоку, здійснюється їх попередній нагрів до 700 °С.

Зразок (кремнієва пластина товщиною 1 мкм на слюдяній основі товщиною 0,5 мм) встановлюється в камері електронно-променевої установки “УВН-71” в спеціальних утримувачах, приєднаних через ізолювані роз’єми до стінок камери. Після виведення вакуумної камери у робочий режим (залишковий тиск порядку $5 \cdot 10^{-7}$ Па) зразок повільно (протягом 25-30 хв) розігрівають інфрачервоними нагрівачами (кварцовими лампами “ЛК-1000”) до 700 °С. Температуру підігріву контролюють електронними термодатчиками приладу “РИФ-101” з використанням хромель–алюмелевих термопар, які знаходяться в контакті зі слюдяною основою. Задану температуру підтримують на протязі 5-10 хв. (з точністю до 30 °С), після чого здійснюють проплавлення зразка електронним променем (діаметр променя на поверхні кремнію становить 10 мкм) за заданим розподілом та заданою траєкторією, що відтворює контур масиву консолей. Для зменшення градієнта температур по довжині зразка, площа поверхні контакту електродів з кремнієм повинна бути мінімальною. З цієї ж метою необхідне проплавлення роблять в середній частині зразка, рис.Б.2.

В процесі електронно-променевого впливу реєструвались наступні параметри електронного променя:

- напруга прискорення, $U_{np} = 3 - 3,2$ кВ;
- сила струму, $I = 250 - 270$ мА;
- швидкість електронного потоку, $V = 18 - 22$ см/с;

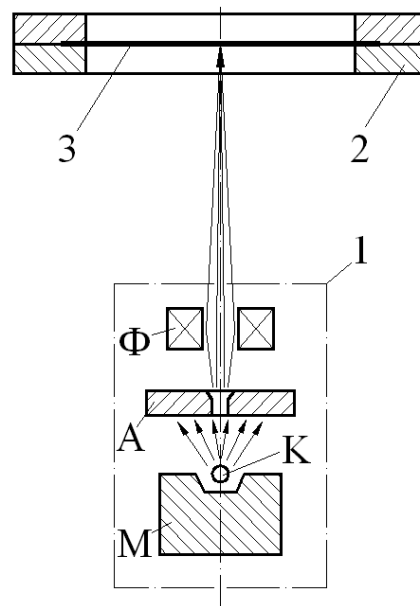


Рисунок Б.2 – Схема електронно-променевого проплавлення кремнієвого зразка у вакуумі: 1 – електронно-променева гармата; 2 – затискний пристрій; 3 – оброблюваний кремнієвий зразок; А – анод; К – катод; М – модулятор (управляючий електрод); Ф – фокусуючі електромагнітні котушки

- відстань від центра фокусування системи до зразка, $d = 30 - 32$ мм;
- сила струму фокусування, $I_{\phi} = 120 - 135$ мкА.

Електронно-мікроскопічне дослідження поверхні зразка обробленої електронним потоком дозволило встановити (рис.Б.3), що в зоні дії електронного потоку спостерігається зона проплавлення, а на поверхні, що безпосередньо межує із зоною проплавлення, спостерігається велика щільність дислокацій, яка зменшується по мірі віддалення від границі проплавлення. Це пов'язано з тим, що якість обробки кремнію залежить від характеру його руйнації в зоні дії

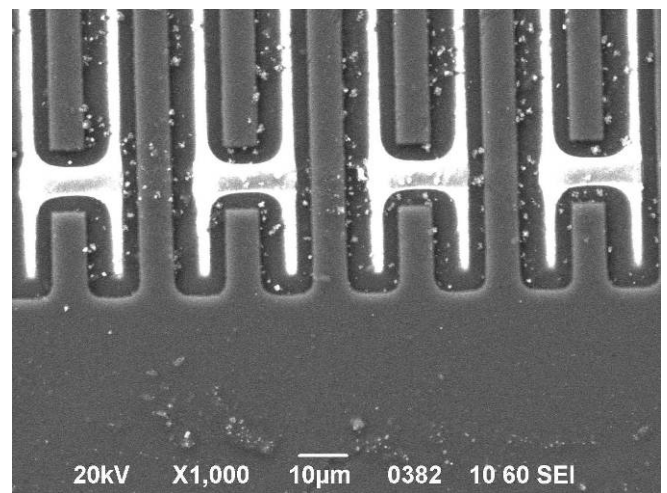


Рисунок Б.3 – Зовнішній вигляд зони проплавлення кремнієвого зразка (електронний мікроскоп “Phenom proX”)

електронного променя. Так, при енергії електронів більше 4 кеВ одиночна лунка в зразку з кремнію має радіус входу більший за діаметр променя; при цьому в центрі лунки спостерігається проплавлення, а на периферії сколювання і тріщини. Для одиночних лунок (отриманих одиночним імпульсом) в зразку з кремнію характерним є те, що площа проплавлення охоплює майже всю поверхню, а розміри лунки значно менші ніж в зразку з кераміки. Поблизу границі плавлення і на деякій відстані від неї на щільному фоні дислокацій спостерігаються ямки травлення набагато більших розмірів від вихідних дислокацій.

Переріз зони проплавлення зразка електронним променем має форму кинджального проплавлення, де нові дислокації перетинаються під кутом 60° . При цьому, зона проплавлення є рівнобедреним трикутником створеним дислокаціями, під основою якого спостерігається скупчення дислокацій, що відділені від трикутника бездислокаційною областю.

Заключною стадією виготовлення блоку консолей є напилювання мікродзеркала (золотого покриття) з тильної поверхні цих консолей (кантилеверів), що є необхідною умовою для отримання високоточних та відтворюваних результатів на етапі підведення зонду до досліджуваної поверхні.

Відомо два методи очистки золотої поверхні кантилеверів для їх подальшої модифікації. Перший метод – травлення золотої поверхні кантилеверу в 30%-му розчині хлористо-азотної кислоти. Недолік методу полягає в тому, що після незначного числа циклів очистки золотий шар на поверхні кантилеверу може повністю розчинитися.

Інший варіант очистки поверхні кантилевери – обробка за допомогою плазми атомарного кисню або азоту. Проте, застосування другого варіанту очищення, веде до пересичення самого матеріалу консолі (кремнію) іонами кисню або азоту, що утворює на їх поверхні з'єднання типу SiO_x , SiN_y , чим значно зменшує міцність на згинання та гнучкість консолі. Автором пропонується використовувати попереднє ультразвукове очищення

кремнієвих консолей з подальшим іонним очищенням у вакуумі, в одному технологічному циклі з процесом термовакуумного нанесення покриття. В результаті таких процедур обробки поверхні, структура полікристалічного шару золота зберігається. Слід також зазначити, що проведення декількох циклів описаних процедур обробки кантилеверів не зменшує відтворюваність результатів підведення зонду до поверхні.

Конденсаторне приварювання консолі до п'єзочипу. Конденсаторне приварювання – найбільш поширений та універсальний метод, що застосовується для приварювання різноманітних елементів в мікроелектроніці. Суть процесу полягає в тому, що електричний заряд, накопичений в конденсаторах приварювального апарату, розряджається через тонкий наконечник на голівці шпильки або втулки. Накопичена енергія витрачається на розплавлення поверхневого шару виробів, що з'єднуються, в результаті чого і створюється надійне приварне з'єднання. Перевагами використання конденсаторного приварювання в технологічному процесі виготовлення вимірювального інструменту АСМ є: можливість приварювання дуже тонких об'єктів; швидкодія процесу приварювання; можливість приварювання різнорідних матеріалів.

Процес конденсаторного приварювання консолі до п'єзочипу відбувається наступним чином. На п'єзочип, що встановлюється на струмопровідну основу автоматизованої системи для конденсаторного приварювання пристроїв мікроелектроніки (наприклад, EVG540) накладається матриця консолей на слюдяній основі. З'єднані таким чином п'єзочип та матриця консолей поступають в робочу зону системи приварювання так, щоб один електрод знаходився над місцем, де відбуватиметься зварювання, а другий під ним, рис. Б.4.

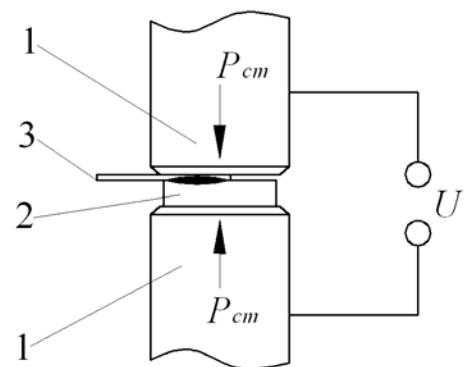


Рисунок Б.4 – Схема реалізації процесу контактної зварювання елементів чутливої системи АСМ

Коли елементи системи контролю АСМ підготовлені до приварювання, затискний пристрій притискає виріб (зусилля $P_{cm} = 25 - 30$ мН), а між електродами і затиснутими частинами зварюваного виробу, починає проходити струм $I = 2 - 2,5$ А (час розряду $t = 1 - 5$ мкс), напруга, прикладена між електродами, при цьому становить $U = 10 - 12$ В.

Це веде до розплавлення елементів виробу в певних місцях так, що атомарна структура поверхні матеріалу п'єзочипу та консолей руйнується, а атоми розплавлених матеріалів починають перемішуватися між собою. Після охолодження утворюється спільна зварювальна структура діаметром $3 - 10$ мкм. При цьому жодний присадний матеріал не використовується, а усі з'єднання виконуються за рахунок плавлення основного матеріалу та одночасного притиснення елементів зварювальної конструкції.

Кріплення вольфрамового дроту заготовки під зонд до консолі. Наступним етапом технологічної схеми є кріплення готового зонду до консолі. Для цього пропонується використовувати дифузійне зварювання, як таке, що дозволяє високоточно, якісно та стабільно з'єднувати металеві (вольфрамовий зонд) та неметалеві (кремнієва консоль) матеріали.

У своєму складі (рис.Б.5) установка для дифузійного зварювання має вакуумну камеру 1, в якій розміщуються зварювані деталі 2. Деталі розігріваються системою нагрівання 3 з робочим елементом 4. Нагрівання здійснюється енергією високочастотного поля. Розрядження, що створюється у камері здійснюється за допомогою вакуумної системи 5. Необхідний тиск в зоні контакту деталей створюється системою стиснення 6.

Технологічні параметри процесу дифузійного зварювання наступні:

- робочий вакуум, $p = 10^{-1} - 10^{-3}$ Па;
- час зварювання, $t = 30 - 45$ с;
- стискаюче зусилля, $F_{cm} = 0,3 - 0,7$ кгс/мм²;
- енергія зварювання, $E = 5 - 8$ Дж;
- частота високочастотного зварювального поля, $f = 440$ кГц.

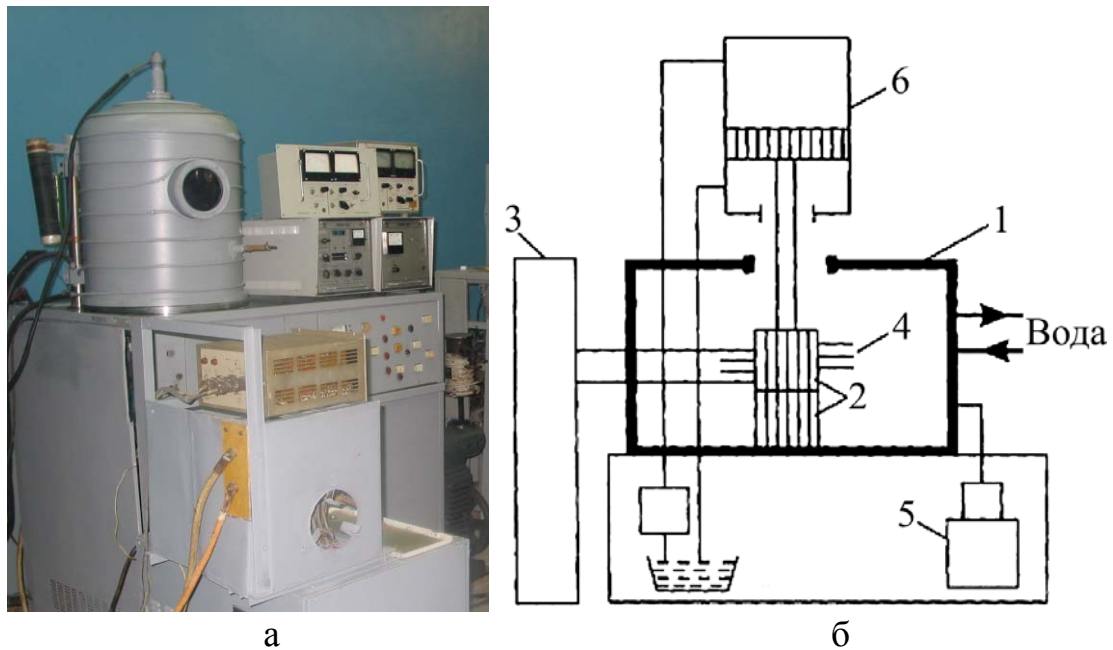


Рисунок Б.5 – Зовнішній вигляд (а) та схема (б) експериментальної установки для дифузійного зварювання на базі вакуумної установки “УВН-71”:

1 – вакуумна камера; 2 – зварювані деталі; 3 – система нагрівання;
4 – робочий елемент; 5 – вакуумна система; 6 – система стиснення

При цьому, суттєвою перевагою використання методу дифузійного приварювання вольфрамового дроту до кремнієвої консолі є те, що в процесі дифузійного зварювання не змінюються механічні властивості зварюваних матеріалів, що є принциповим при виготовленні зондів для АСМ.

Виготовлення зондів на консолі системи контролю АСМ. Основні методи створення зондів поділяються на механічні та фізико-хімічні. При виготовленні зондів АСМ за технологією, запропонованою автором, буде використовуватися саме механічний метод, що вигідно відрізняється простотою реалізації, відсутністю складного та вартісного обладнання та експресністю. Технологічний процес виготовлення зондів для АСМ містить три етапи:

- попередня підготовка заготовки зонду: механічні операції (зсув або зріз металевго дроту з вольфраму), при яких гарантується загострення вістря дроту;
- електрохімічне травлення металевго вістря для придання зондам

необхідної форми, симетрії вістря, гостроти та кута конусу;

– заточування зондів за допомогою електронно-променевого методу.

Попередня підготовка заготовки зонду. Попередня підготовка заготовки зонду полягає у підготовці заготовки з вольфрамово-ренієвого дроту марки ВР-27 ВП ТУ 48-19-274-77 діаметром 0,1 мм на якій, за допомогою оптичного мікроскопу, обирається рівна, однорідна та бездефектна ділянка дроту довжиною не менше 2 мм, та подальше її зрізання ножицями гільйотинного типу під кутом 20° до осі дроту.

Електрохімічне травлення вістря зонду. Задля придання зондам необхідної форми, симетрії вістря, гостроти та кута конусу [13], автором використовується електрохімічне травлення вольфрамової заготовки зонду в лужному електроліті. Для цього використано експериментальну травильну установку, рис.Б.6, принцип роботи якої наступний.

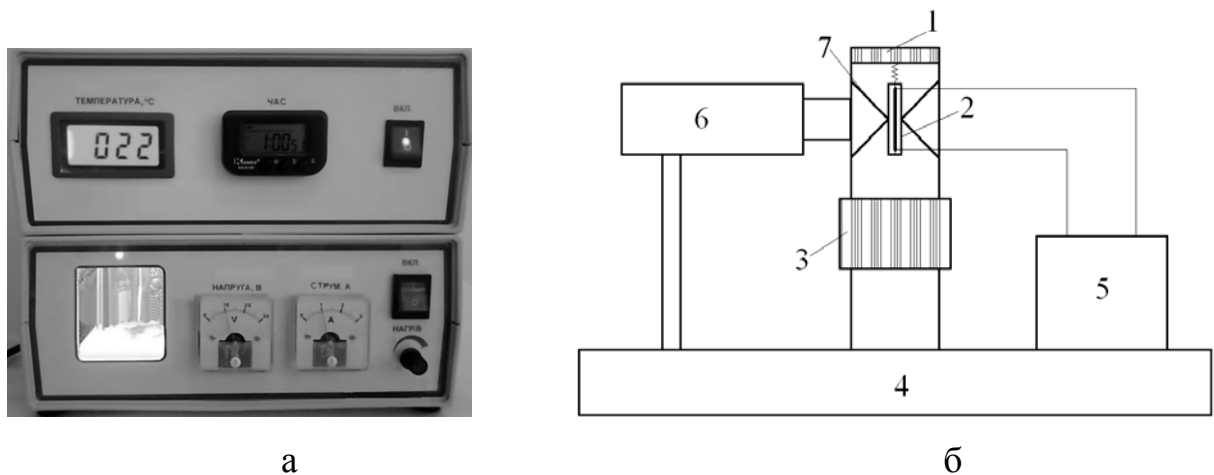


Рисунок Б.6 – Зовнішній вигляд (а) та схема (б) експериментальної установки для травлення зондів АСМ: 1 – універсальний датчик взаємодії; 2 – капіляр з електролітом; 3 – п'єзоелектричний пристрій для поступового переміщення заготовки; 4 – основа установки; 5 – електронний блок управління напругою; 6 – оптичний мікроскоп; 7 – утримувач капіляру із заготовкою

1. Підготовлений розчин лугу необхідної температури заливається в капіляр 2, після чого в останній опускається вольфрамовий дріт-заготівка. Підготовлена система встановлюється в установку травлення, а кінці зонду

підключаються до електронного блоку 5 управління напругою.

2. Запускається процес травлення. При цьому, на електроліті починає активно виділятися водень, що можна спостерігати у мікроскоп 6, як і сам процес стоншення вольфрамового дроту всередині капіляру. Процес травлення відбувається у водних розчинах лугів (розчині 2М NaOH) при розкладанні води з утворенням іона WO_4^{2-} . При цьому, процес виділення водню на вольфрамовій заготовці залежить від pH розчину, щільності струму та виду поверхні. Процес анодного розчинення ведеться при щільності струму $j = 0,1 - 0,5 \text{ А/см}^2$ та температурі 22°C . Катодна щільність при цьому становить $0,05 - 0,1 \text{ А/см}^2$. Швидкість розчинення вольфраму становить $0,98 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{А} \cdot \text{хв}$ при напрузі 6 В, а сам процес травлення триває 120 – 140 хв. Переважною особливістю даної установки травлення є автоматичне переміщення пристроєм 3 заготовки зонду в електроліті, що дозволяє отримати високоточний профіль вістря зонду та уникнути артефакти “сходинок” при використанні зонду в АСМ-дослідженнях.
3. У міру травлення, товщина заготовки стає достатньо малою, що призводить до стрибкоподібного зменшення навантаження на універсальний датчик взаємодії 1. При цьому відбувається автоматичне розімкнення електричного ланцюга блоку 5, чим зупиняється процес травлення.
4. Утримувач з датчиком 7 за допомогою пристрою 3 виводиться із робочої зони, після чого капіляр з виготовленим зондом видаляється з утримувача.
5. На завершення, кінчик зонду промивається дистильованою водою і сушиться у вакуумі, оскільки залишки вологи можуть електрично шунтувати електроди п'єзоелементу на елементі контролю. У випадку, якщо травлення більше здійснюватися не буде, капіляр з лугом видаляється із установки та промивається дистильованою водою.

Слід зауважити, що на формування профілю зонда, впливає ряд фізичних факторів, а також додаткові умови, як-то: утворення меніску на поверхні дрітної заготовки, висота якого змінюється залежно від діаметру

заготовки та хімічного складу електроліту; форма електроду; положення та переміщення заготовки в процесі формування зонду, тощо.

Для компенсації витрат травника, автором використовуються електроди у вигляді двох паралельних пластин з отворами в центрі. В цьому випадку електроліт, за рахунок змочування, повністю заповнює простір між пластинами і, в процесі витрати, заповнюється в центральному отворі за рахунок цих запасів. Проте слід пам'ятати, що в процесі травлення вольфрамовий дріт покривається шаром оксиду WO_2 , що уповільнює процес травлення до декількох хвилин.

Електронно-променеве заточування зонду.

Завершальним етапом виготовлення зондів є їхнє електронно-променеве заточування. Створений у вакуумі параксіальний потік електронів спрямований по прямій вздовж якої лежить центральна вісь зонду, рис.Б.7. У разі вольфрамового зонда, ця операція також видаляє ізоляційний шар оксиду і веде до створення зонду з радіусом вістря R від 5 нм.

Таким чином, автором представлені технологічні основи виготовлення універсального інструменту за допомогою якого можна проводити комплексні дослідження стану, топології та механічних характеристик пристроїв МСТ в одному вимірювальному циклі.

Модифікування стандартних кремнієвих зондів. За іншою схемою виготовлення вимірювального інструменту передбачається застосування стандартного п'єзочипу з кремнієвими зондами модифікованими вуглецевим функціональним покриттям для подальшого проведення за їх допомогою досліджень твердих матеріалів в контактному режимі. Ефективним методом для отримання таких покриттів може стати метод термічного випаровування у вакуумі.

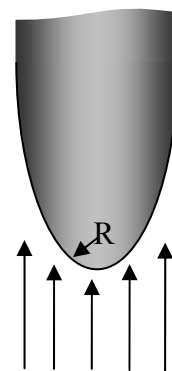


Рисунок Б.7 – Схема електронно-променевого заточування зонду радіусом вістря R (стрілками показано напрям дії електронного потоку)

Тому актуальними є отримання ультратонких (< 10 нм) зносостійких вуглецевих покриттів на зондах АСМ термічним осадженням у вакуумі, а також вивчення їх експлуатаційних властивостей при комбінованому контролі мікрогеометрії та механічних властивостей поверхонь діелектриків.

Модифікування поверхні кремнієвих зондів базувалося на методиці, схема якої представлена на рис.Б.8.



Рисунок Б.8 – Технологічна схема (схема 2) модифікування зондів покриттям

Очікуваним технічним результатом від модифікації поверхонь кремнієвих зондів вуглецевим покриттям є підвищення якості (зменшення субшорсткості, поруватості) та терміну надійної експлуатації їх поверхонь (підвищення їх мікротвердості та зносостійкості). Для цього обробляли отримані покриття стрічковим низькоенергетичним ($E \leq 6$ кеВ) електронним потоком при попередньому нагріві виробів для стабілізації теплових умов та

охолодженні виробів після електронно-променевої мікрообробки.

Як зразки-свідки використовували підкладки (диски діаметром 30 мм, товщиною 0,1 мм) із кремнію марки Кр0 (виробник: ПАТ “Укрп’єзо”, м. Черкаси). Зразками для осадження були зонди марки CSC38 (виробник: “Micromash”, м.Ветцлар, Німеччина).

Технологічні дослідження проводили на електронно-променевій установці, яка виготовлена на базі стандартної промислової вакуумної установки “УВН-71”.

Підготовка зразків кремнієвих зондів. Кремнієві зонди марки CSC38 закріплюють у тримачі (рис.Б.9), який попередньо очищували 15%-вим розчином ізопропилового спирту в ультразвуковій ванні [20].

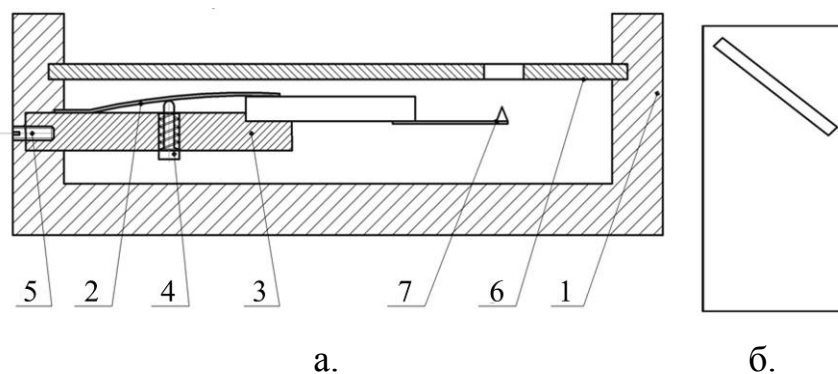


Рисунок Б.9 – Схематичне зображення тримача для зондів: а – переріз профілю тримача; б – вигляд на тримач згори; 1 – корпус тримача; 2 – жорстка пластина; 3 – столик; 4 – кнопка відхилення жорсткої пластини; 5 – шпилька; 6 – маска, вид згори (б); 7 – чутливий елемент АСМ

Після цього над зондом розташовувалася знімна маска. Очищення самого зонду необхідно проводити іонним очищенням безпосередньо у вакуумній камері за наступних умов: робочий вакуум процесу очищення – 0,1 – 10 Па, напруга на іонізаторі – 2 – 2,5 кВ, струм іонізатора – менше 10 мкА.

Чутливий елемент АСМ розташовується на столику і затискається жорсткою пластиною, після чого столик жорстко закріплюється в корпусі за допомогою шпильки. Над зондом, в пази корпусу встановлюється маска, в

якій зроблено отвір шириною 1–1,5 мм під кутом 45° . Маска переміщується в корпусі тримача і встановлюється таким чином, щоб отвір був розміщений над зондом.

Підготовка технологічного обладнання. Узагальнена схема пристрою для прецизійної обробки зразків-свідків представлена на рис.Б.10.

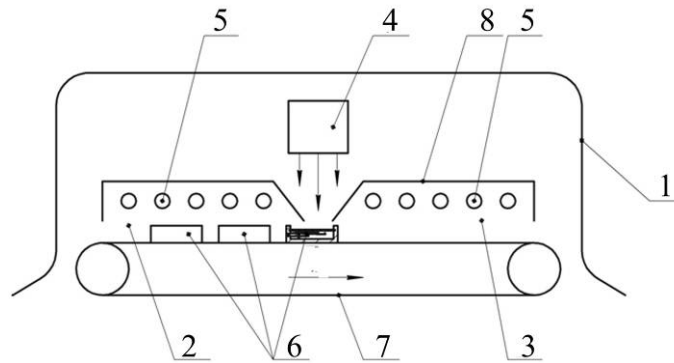


Рисунок Б.10 – Схема пристрою для обробки зразків: 1 – вакуумна камера; 2 – піч нагріву; 3 – піч охолодження; 4 – електронно-променева гармата; 5 – нагрівач; 6 – зразки; 7 – блок транспортування; 8 – тепловий екран.

Після завантаження зразків у вакуумну камеру в ній створюється робочий вакуум $10^{-2} - 10^{-4}$ Па. Далі вироби розміщалися в зону печі нагріву, де вони розігріваються нагрівачами до попередньої температури 570 – 620 К, що усуває можливість виникнення термонапружень в оброблювальних зразках. Більші температури не припустимі через можливість досягнення зразком точки Кюрі, що призведе до деполяризації чутливих елементів АСМ.

Нагрівачі розташовані в печах нагріву і охолодження таким чином, щоб забезпечити рівномірний та однаковий за температурою нагріву (або охолодження) кожного з виробів. Екрани печі нагріву і печі охолодження мають багат шарову конструкцію і забезпечують термоізоляцію виробів у вакуумній камері. Після попереднього нагріву, вироби за допомогою блока транспортування переміщують з печі нагріву, спочатку – в зону осадження тонких покриттів, а потім в зону дії електронного потоку гармати.

Інтенсивність електронного потоку, технологічні параметри

електронної гармати і швидкість переміщення виробів під ним забезпечують необхідні умови термічної дії електронів на матеріал (оплавлення поверхневого шару нанесеного покриття). Після термічної мікрообробки електронним променем вироби потрапляють в піч охолодження, де охолоджуються протягом певного часу. Температура в печах регулюється електронними термодатчиками приладу “РИФ-101”.

Визначення допустимих режимів нанесення тонких впорядкованих покриттів методом термовакуумного осадження. Для визначення допустимих режимів осадження тонких впорядкованих покриттів на поверхнях нанометричного інструменту проводили пошарове формування на зразках атомарних покриттів методом резистивного осадження. Так, дослідження зразків-свідків, на які наносили тонку плівку з порошку осаджуваного матеріалу (виробник: ТОВ “Порошкові нанотехнології”, м. Черкаси) дозволило визначити режими осадження: робочий вакуум $p = 10^{-3}$ Па, енергія випаровування $E = 900$ Дж, робоча температура випаровування $T = 250 - 300$ °С, струм випарника $I = 75 - 150$ А, час осадження $t = 7 - 15$ с, середній розмір осаджуваних часток – $0,8 - 1,2$ мкм.

Визначення допустимих режимів електронної обробки на зразках свідках. На сформованому покритті отримували впорядковані структури через знімну молібденову маску. Подальша низькоенергетична електронно-променева мікрообробка отриманих покриттів приводила до випаровування буферного шару і, одночасно з цим, формуванню однорідного і впорядкованого покриття на поверхні діелектричних зондів. Створення буферного шару пов’язане з необхідністю збільшення когезійної міцності осаджуваного покриття і формування більш рівномірного покриття.

Параметри електронної мікрообробки, які визначали дослідним шляхом, мали значення: сила струму розігріву катоду $I = 50 - 150$ мА; напруга прискорення $U_{пр} = 0,5 - 3,5$ кВ; час електронної мікрообробки $t = 0,1 - 5$ мкс.

Нанесення тонких вуглецевих покриттів на зонди АСМ з подальшою їх модифікацією електронним потоком. Процес комбінованого отримання

тонких вуглецевих покриттів на зондах АСМ ґрунтується на методі комбінованого термовакуумного формування впорядкованих наноструктур на діелектричних поверхнях, в основу якого покладене термічне осадження у вакуумі тонких та ультратонких ($\sim 5 - 8$ нм) високооднорідних покриттів з подальшим формуванням на них впорядкованих наноструктур.

Особливістю такого комбінованого методу є здійснення його в одному технологічному циклі (термовакуумне осадження – електронно-променева модифікація покриття) за незмінних умов робочого середовища (вакуум $p = 10^{-6}$ Па), що виключає утворення хімічних сполук осаджуваного покриття з елементами доквілля на проміжному етапі формування наноструктури.

Процес формування покриття здійснювали резистивним осадженням порошку вуглецю (графітна форма, дисперсність – $0,12 - 0,32$ мкм) за наступних режимів: струм нагрівача – 90 А; час осадження – 7 с; відстань від навіски з порошком до поверхні, на яку здійснювалося осадження – 30 мм; кут розпилювання – 120° .

На наступному етапі здійснювали електронно-променеву модифікацію сформованого покриття. Застосування в даному випадку стрічкового електронного потоку, генерованого електронно-променевою гарматою Пірса, пов'язано з високою однорідністю і керованістю розподілу енергії в такому потоці, що дозволяє досягти більш щадного режиму прецизійної електронно-променевої обробки ультратонких покриттів на поверхнях кремнієвих зондів. Це, у свою чергу, виключає відшарування і розтріскування таких покриттів, чим обов'язково супроводжується процес різкого перерозподілу теплової енергії, пов'язаній з термічним ударом, який спостерігається при обробці точковими джерелами.

Електронно-променева модифікація покриттів здійснювалася через маску за наступних режимів: питома потужність електронного потоку – 500 Вт/м²; струм електронного потоку – 60 мА; час модифікації – $4 \cdot 10^{-6}$ с.

Після припинення процесу осадження відбувалася витримка протягом $10 - 15$ с за умов постійної температури $360 \pm 0,5$ °С.

Таким чином, автором дисертаційного дослідження запропонована технологія модифікування кремнієвих зондів зносостійким вуглецевим покриттям, що приводить до покращення їх експлуатаційних властивостей (зменшує вірогідність виникнення артефактів сканування на 20 – 22 %), а розроблена технологія та підібрані режими нанесення і модифікування покриттів можуть бути запропоновані фірмам-виробникам зондів.

Підбиваючи підсумки, можна зробити висновки, що за запропонованими схемами можна отримати інструмент для широкого спектру нанометричних досліджень з використанням АСМ. Так, на рис.Б.11 наведені приклади такого інструменту.

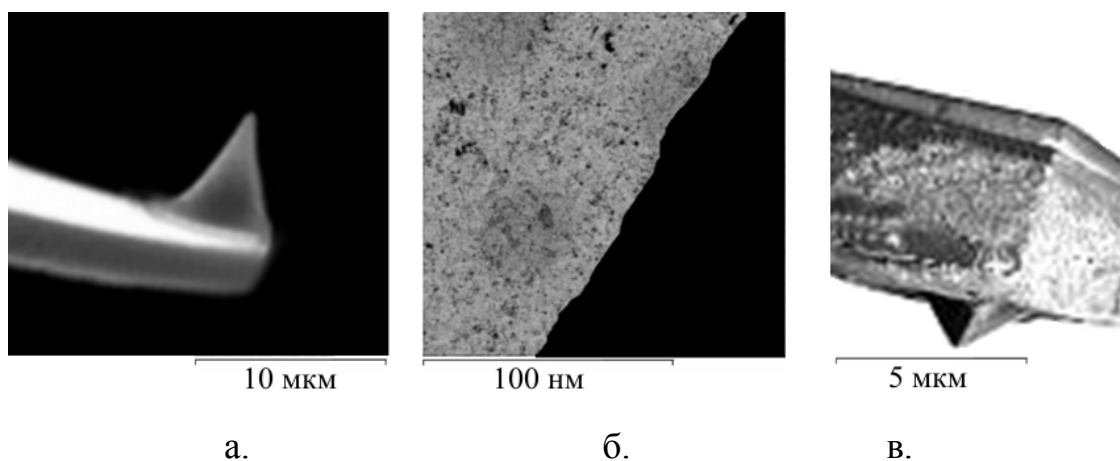


Рисунок Б.11 – Мікрофотографії зондів: а – кантилевер з конічним вольфрамовим зондом отримані за схемою 1 для топографічних досліджень плоских поверхонь; б – мікрофотографія ділянки зонду, модифікованого вуглецевим покриттям за схемою 2 для комбінованих досліджень; в – кантилевер з пірамідальним зондом із WC отриманих за схемою 1 з подальшим модифікуванням за схемою 2 для nanoіндентування (прилад: “JEOL JSM-6700F”)

Контроль виготовлення та аналіз результатів випробовування отриманих зондів. Виготовлені за запропонованими автором технологіями зонди для досліджень в АСМ підлягали обов’язковому контролю в процесі виготовлення окремих елементів вимірювальної системи. Також проводився аналіз хімічних, структурних та експлуатаційних характеристик зондів, отриманих у вищезазначені способи. Отримані вироби тестувалися на

повірених тест-зразках. Результати проведених досліджень та аналізу представлені нижче.

Перевірка точності відхилення кантилеверу. Для роботи системи контролю в контактному режимі важливим питанням є точність визначення відхилення кантилеверу АСМ. Вона визначається рівнем теплових шумів самого кантилеверу, а також шумами оптичної системи. Величина теплових шумів (k) та відхилення (A) кантилеверу теоретично розраховується за формулами:

$$k = \frac{E \cdot h^3 \cdot w}{4 \cdot l^3}; \quad (\text{Б.1})$$

$$A = \sqrt{\frac{T \cdot k_b}{k}}, \quad (\text{Б.2})$$

де E – модуль Юнга матеріалу кантилеверу, l , w , h – довжина, ширина і товщина кантилеверу, k – жорсткість кантилеверу, k_b – постійна Больцмана ($k_b = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К), T – температура.

Для кремнієвого кантилеверу ($E = 10^9$ ГПа) довжиною $l = 350$ мкм, шириною $w = 32,5$ мкм і товщиною $h = 1$ мкм теплові шуми складатимуть:

$$k = \frac{1,09 \cdot 10^{11} \cdot (10^{-6})^3 \cdot 32,5 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot (3,5 \cdot 10^{-4})^3} = 2 \cdot 10^{-9} = 2 \text{ нм},$$

що ведуть до відхилень кантилеверу за нормальних умов ($T = 293$ К):

$$A = \sqrt{\frac{293 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}}{2 \cdot 10^{-9}}} = 14,2 \cdot 10^{-9} = 14,2 \text{ нм}.$$

Шуми оптичної системи з'являються в зв'язку з використанням лазера в якості вимірювача положення кантилевера. По-перше, лазер може бути нестабільний по потужності (інтенсивність лазерного випромінювання може відхилятися від середнього, номінального значення). Оскільки частіше за все периферійна частина лазерного променя відбивається від поверхні та потрапляє на фотодіод, ця нестабільність може призвести до зміни сигналу “Deflection”. Наприклад, якщо частина променя, яка потрапляє на верхню половину фотодіоду, знаходиться ближче до центру гаусівського розподілу

інтенсивності в пучку ніж нижня, то при невеликому збільшенні потужності сумарна інтенсивність на верхній половині фотодіоду збільшиться сильніше, ніж на нижній. Це призведе до збільшення сигналу “Deflection” і, як наслідок, помилкового спрацьовування зворотного зв'язку.

Шум також може виникати в результаті флуктуацій осі лазерного променя. Відхилення осі променя призводить до відхилення відбитої плями на фотодіоді. При цьому, експериментально доведено, що відхилення осі променя на 50 мкрад рівнозначне переміщенню кантилеверу з довжиною консолі 350 мкм, приблизно на 7 нм по вертикалі. Порівнявши результати теоретичних розрахунків за формулою (Б.2) та результатів експерименту, можна зробити висновок, що найбільший вплив на точність відхилення кантилеверу чинять саме теплові шуми, усунення яких можливе стабілізацією температури в зоні проведення вимірювань (див. п.3.3).

Сигнал “Deflection” також може змінюватися при флуктуаціях розміру лазерного променя. Якщо частина променя, яка потрапляє на верхню частину фотодіоду більше ніж та, яка потрапляє на нижню, то при збільшенні діаметру променя, ця інтенсивність збільшиться сильніше, ніж інтенсивність частини променя, що потрапляє на нижню частину фотодіоду. Оскільки інтенсивність пропорційна площі перетину лазерного променя, в результаті зміниться різниця інтенсивності верхньої та нижньої частини, а, отже, і сигнал “Deflection”.

Перевірка стану поверхні та механічних характеристик нанесеного покриття. Після отримання зразків-свідків, їх поверхню обов'язково перевіряли за наступними параметрами:

- субшорсткості отриманого шару вуглецю методом АСМ (рис. Б.12);
- мікротвердості покриття на поверхні зразків (дослідження проводили в трьох точках на поверхні кожного зразка (рис. Б.13);
- адгезійній міцності покриття до поверхні зразка методом склерометрії (рис. Б.14).

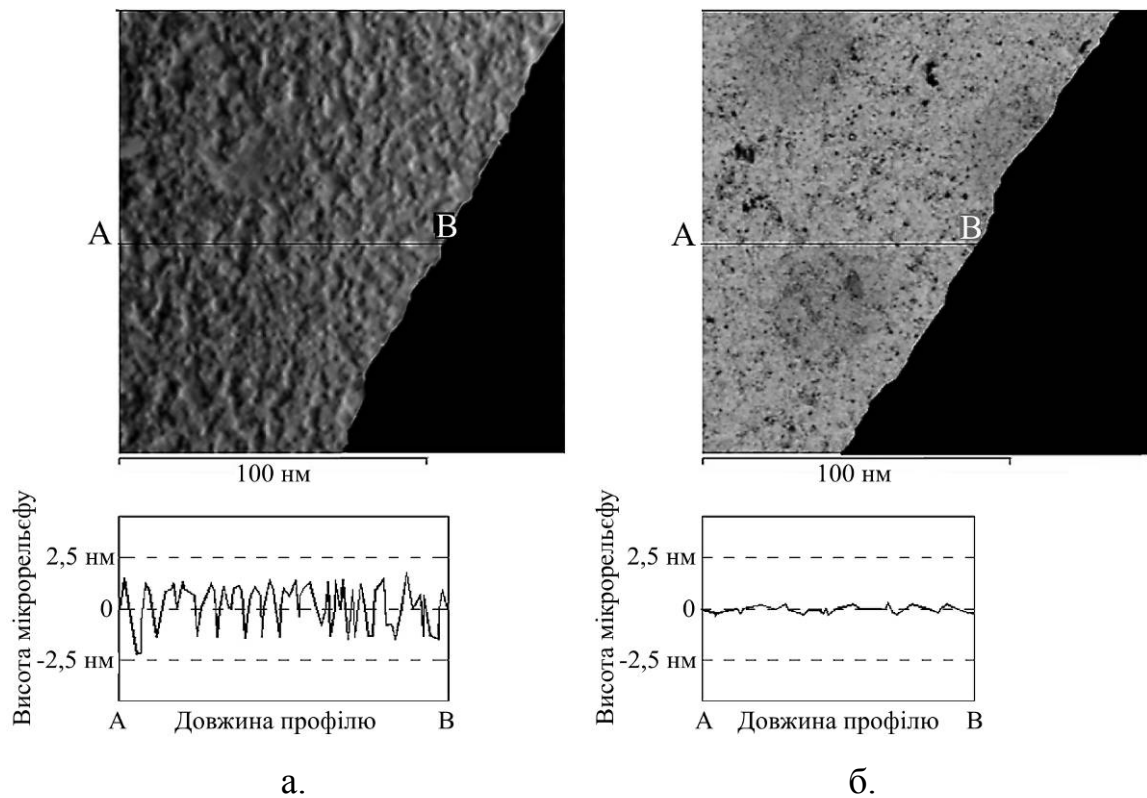


Рисунок Б.12 – Поверхня кремнієвого зонда CSC38 та його мікропрофіль вздовж лінії А–В: поверхня до модифікування (а) та відновлена термовакuumним осадженням вуглецю поверхня (б) (прилад: “JSM-6700F”)

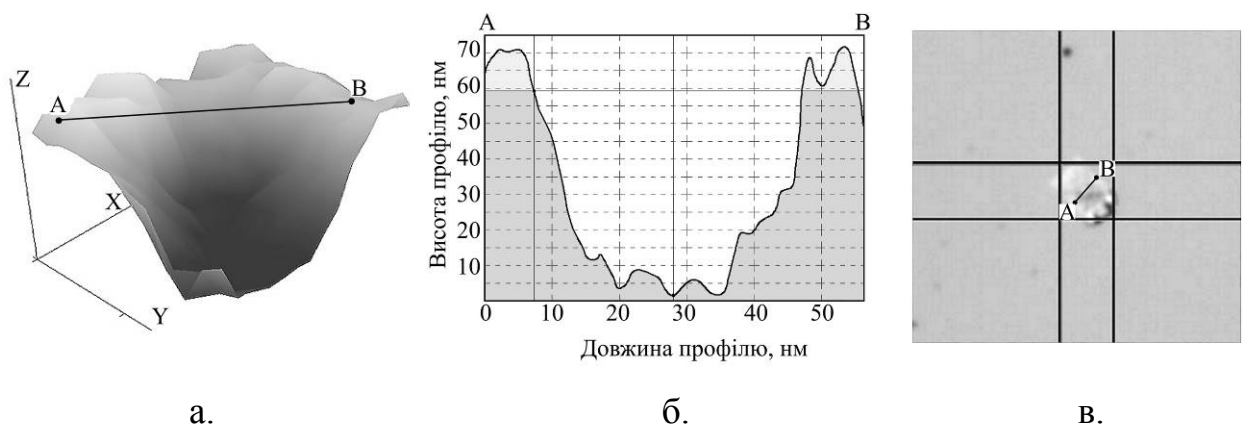
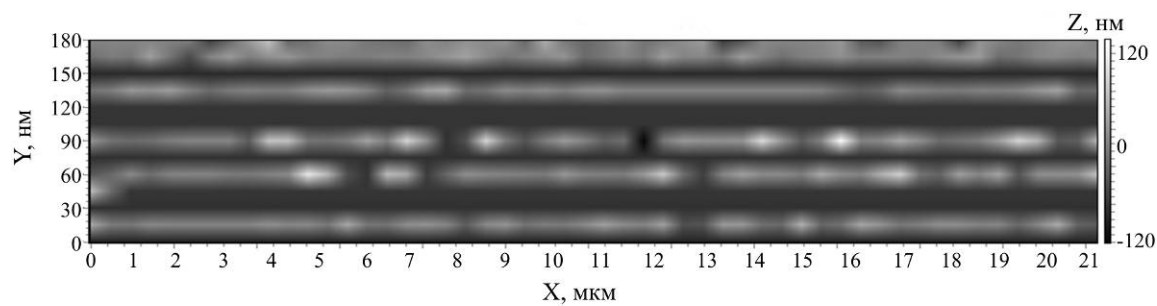


Рисунок Б.13 – Ділянка поверхні кремнієвої пластини (13×13 мкм) з відбитком наноіндентора (метод АСМ) (а); профіль відбитка модифікованого кремнієвого зонда АСМ (б); відбиток алмазної пірамідки (в)

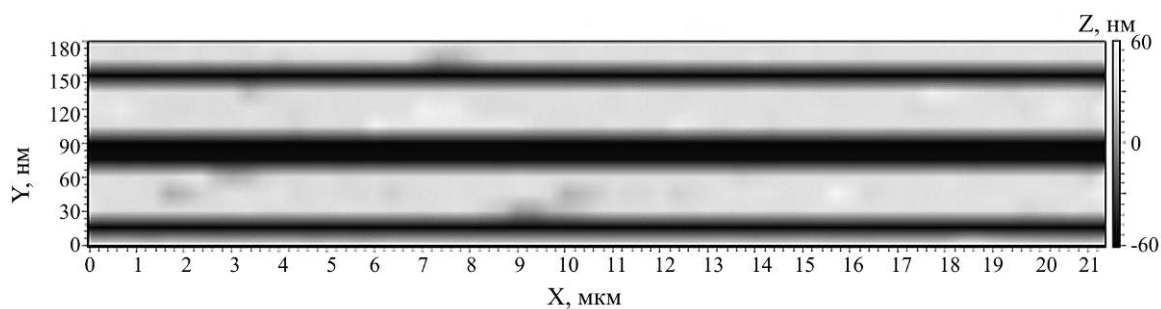
Результати проведених досліджень стану поверхні нанесеного вуглецевого покриття на кремнієвий зонд АСМ після електронно-променевої мікрообробки показані на рис. Б.14.



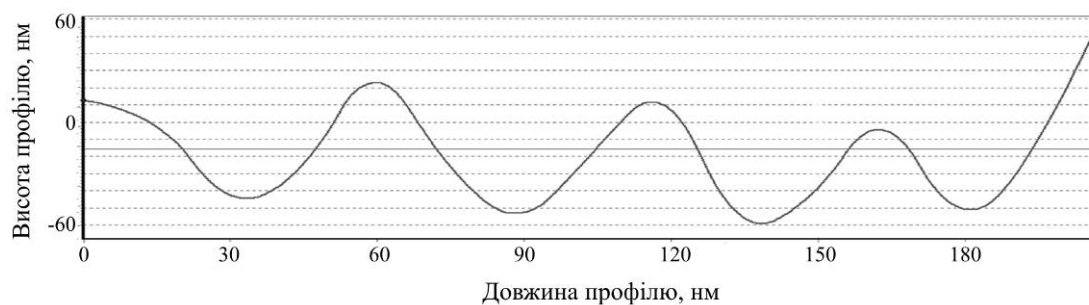
а.



б.



в.



г.

Рисунок Б.14 – АСМ-зображення (а, в) та топограми (б, г) результату склерометрії на тонкому (50 нм) покритті SiO_2 з використанням кремнієвого зонду вихідного (а, б) та модифікованого вуглецевим покриттям (в, г)

Як можна побачити з рис.Б.12, підготовлений до осадження кремнієвий зонд має більш розвинений мікрорельєф (рис. Б.12, а). При цьому, значення субшорсткості поверхні зонда, що було модифіковано за запропонованим

способом, зменшується з $2,5 - 5$ нм до $0,1 - 0,3$ нм. Також значно зменшуються кількість та розміри нанопір, що має поверхня кремнієвих зондів через технологічні особливості їх виготовлення. Це, в свою чергу, зменшує загальну площу поверхні зонда (площу його контакту з досліджуваною поверхнею), чим збільшує точність досліджень, що проводяться цим зондом та зменшує ймовірність виникнення артефактів сканування на $20 - 22\%$.

Результати дослідження мікротвердості модифікованого вуглецевим покриттям кремнієвого зразка та їх порівняння з результатами отриманими мікроіндентуванням за методом Вікерса на приладі “DuroScan-10/20” (експериментальні дослідження проведені в Центрі колективного користування ТОВ “Мелітек-Україна”, м.Київ) наведено на рис.Б.12, де показана зона проникнення зонда-наноіндентора в поверхню зразка (рис.Б.12, а), профіль його відбитка (рис.Б.12, б) та відбиток алмазної пірамідки, що отриманий методом мікроіндентування (рис.Б.12, в).

Порівняння значень мікротвердості, отриманих методами атомно-силової мікроскопії та мікроіндентування за Вікерсом, показали, що результати наноіндентування поверхонь кремнієвих пластин зондами CSC38, модифікованих вуглецевим покриттям мають високу повторюваність та збіжність результатів з атестованим методом мікроіндентування за Вікерсом. Так, мікротвердість кремнієвої пластини, виміряна методом АСМ з використанням модифікованого вуглецевим покриттям кремнієвого зонду, становила $11,62 \pm 1,97$ ГПа, а отримана методом мікроіндентування за Вікерсом – $12,11 \pm 1,33$ ГПа. Максимальна розбіжність результатів вимірювання не перевищувала 5% .

Зносостійкість зондів випробували за методом склерометрії. Дослідними зразками були тонкі (50 нм) покриття SiO_2 на кремнієвій пластині, випробування проводили при навантаженні на зонд – $5 \cdot 10^{-4}$ Н, АСМ-зображення результату склерометрії на прикладі SiO_2 з використанням кремнієвого зонду та кремнієвого зонду, модифікованого вуглецевим

покриттям наведено на рис.Б.14.

За результатами дослідження встановлено, що коефіцієнт зносостійкості при використанні модифікованого зонду складає 25,7 (для порівняння: коефіцієнт зносостійкості алмазу $k = 100$), тоді як при використанні кремнієвого зонду цей коефіцієнт становить 23,1, що пов'язано з більш швидким зношенням кремнієвого зонду без модифікування, а ніж модифікованого зонду.

Для оцінки терміну надійної експлуатації (розбіжність результатів не повинна перевищувати 5%), модифіковані та немодифіковані зонди експлуатувались в контактному режимі при дослідженні кремнієвої пластини з періодичною перевіркою точності результатів при дослідженні калібрувальної решітки TGZ1. Алгоритм проведення тестової перевірки зондів за допомогою калібрувальної решітки наведено на рис.Б.15.

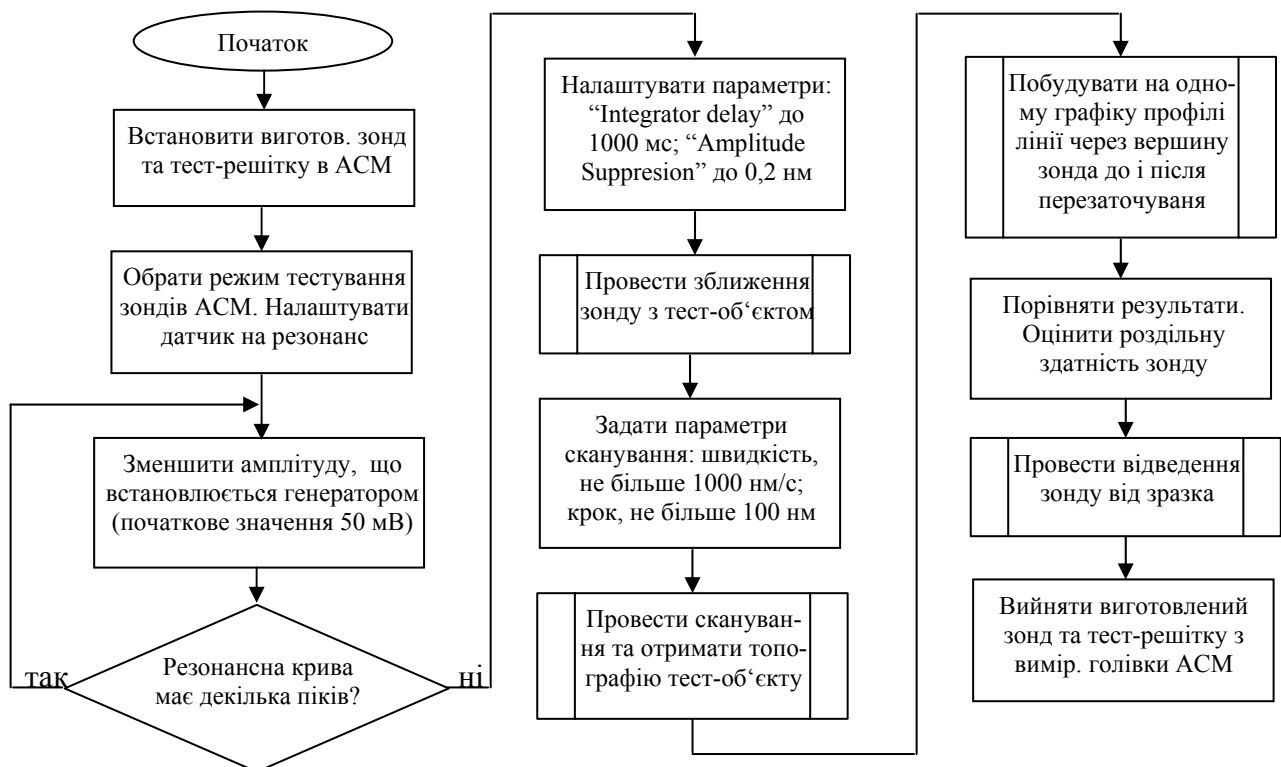


Рисунок Б.15 – Алгоритм проведення тестової перевірки зондів калібрувальною решіткою

На рис.Б.16 наведено мікроснімки фрагментів поверхні зондів та калібрувальної решітки TGZ1 отримані в Центрі колективного користування "Токуо-Воєкі" (м. Київ) (прилад: "JEOL JSM-6700F"), а також результат

сканування калібрувальної решітки вихідним кремнієвим зондом і зондом модифікованим вуглецевим покриттям протягом 100 хвилин експлуатації.

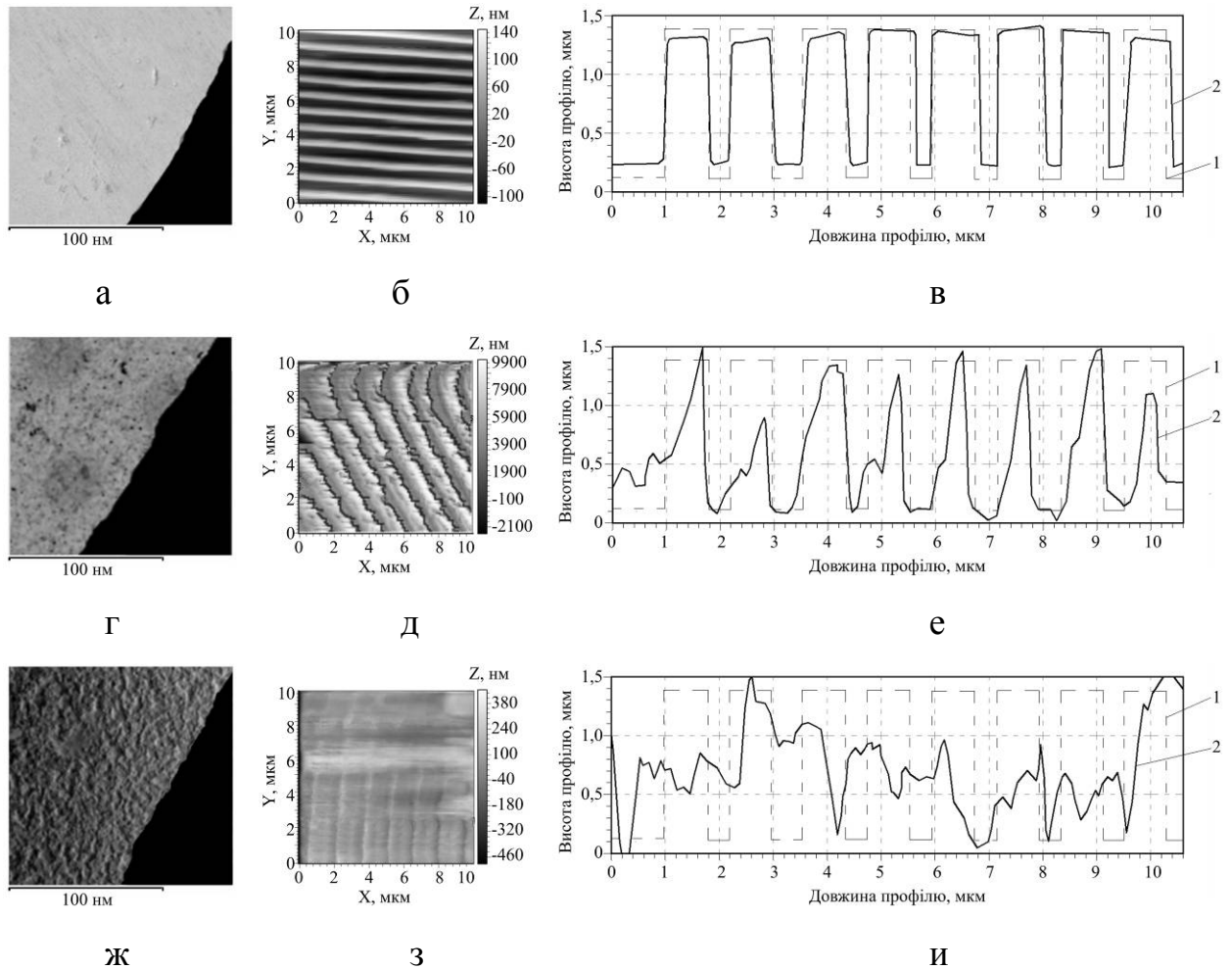


Рисунок Б.16 – Мікроснімки (а, г, ж) фрагменту поверхні кремнієвого зонда CSC38, топограми ділянки її поверхні (б, д, з) та профілі (в, е, и) поверхні TGZ1 (період – $2,2 \pm 0,05$ мкм); вихідні дані (а–в), після дослідження модифікованим (г–е) та не модифікованим (ж–и) кремнієвим зондом (100 хв експлуатації): 1 – вихідний профіль калібрувальної решітки; 2 – профіль решітки отриманий зондом, що експлуатувався.

В результаті проведених досліджень, при яких сканували рельєф калібрувальної решітки TGZ1 (висота рельєфу, що заявляється виробником ("NT-MDT", Росія) становить $1,4 \pm 0,015$ мкм) було визначено час надійної експлуатації зонду (тобто максимальний час, за який висота рельєфу, що визначали, зменшувалося на 5% – до значення 19,1 – 22 нм).

Встановлено, що термін надійної експлуатації кремнієвих зондів для АСМ та граничний термін експлуатації до повного руйнування цих зондів становить: термін надійної експлуатації зондів CSC38 складає 55 – 60 хв, кремнієвих зондів, що модифікувалися вуглецевим покриттям – 100 – 110 хв; граничний термін експлуатації зондів CSC38 складає 80 – 115 хв, кремнієвих зондів, поверхня яких модифікована вуглецем – 140 – 160 хв.

Перевірка біологічної та хімічної стійкості зондів. В якості досліджуваних зразків використано дві групи виготовлених автором дисертації кремнієвих зондів по 5 штук в кожній групі. Перша група зразків експлуатувалася протягом 100 хвилин при скануванні рельєфу поверхні ділянки полімеру на основі поліметилметакрилату (ПММА) в біологічно-активному середовищі (розчин гідроксиапатиту в гліцерині, що містить абразив), рис.Б.17.

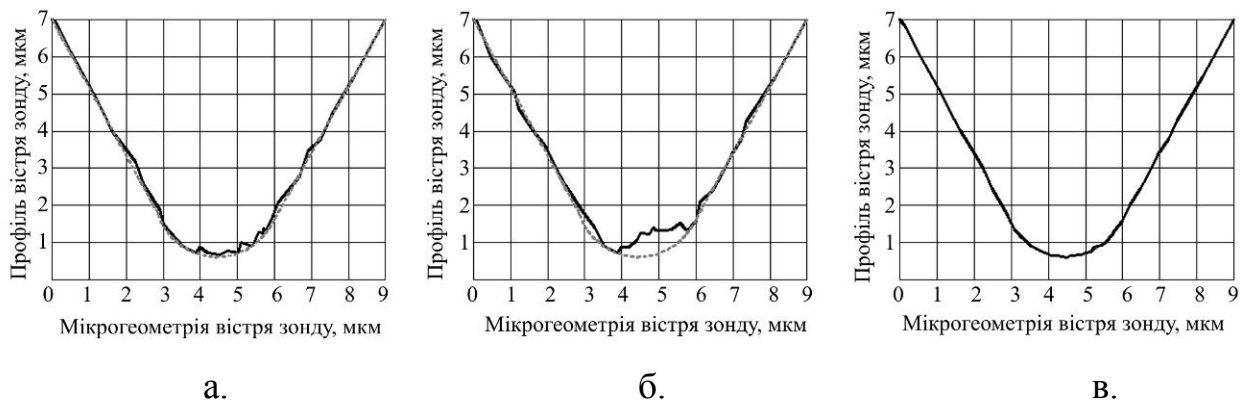


Рисунок Б.17 – Мікрогеометрія поверхні кремнієвого зонда до його експлуатації (а), після експлуатації протягом 100 хвилин в біологічно-активному середовищі (б) і зонда, поверхня якого модифікована тонким покриттям TiO_2 , після експлуатації протягом 100 хвилин в біологічно-активному середовищі (в)

Інша група зондів також піддавалася експлуатації протягом 100 хвилин в біологічно-активному середовищі, але після термовакуумного осадження тонкого покриття TiO_2 на їх поверхню.

В результаті проведених експериментів було встановлено факт швидкого зношування зондів при визначенні мікрорельєфу поверхні

фрагмента ПММА в біологічно-активному розчині, який призначений для зберігання імплантатів. Так, було встановлено, що час повного зношення зондів становить 80 – 100 хвилин (для порівняння: при експлуатації зондів в інертному середовищі дистильованої води середній час повного зношення складав 120 хвилинами). Також встановлена можливість підвищення стійкості зондів для АСМ до хімічно активних середовищ. Це стало можливим завдяки формування ультратонких (менше 100 нм) оксидних покриттів на їх поверхні термовакuumним осадженням матеріалів.

Проведені рентгенофлуоресцентний аналіз для визначення хімічного складу отриманих зондів та покриттів на них (прилад: “S1 Titan”), а також дифрактометричний аналіз (прилад: “D8 Fabline”) показали високу однорідність, ювенільність та упорядкованість структури покриття, рис.Б.18, а отримані зонди, за своїми параметрами не поступаються зондам світових марок.

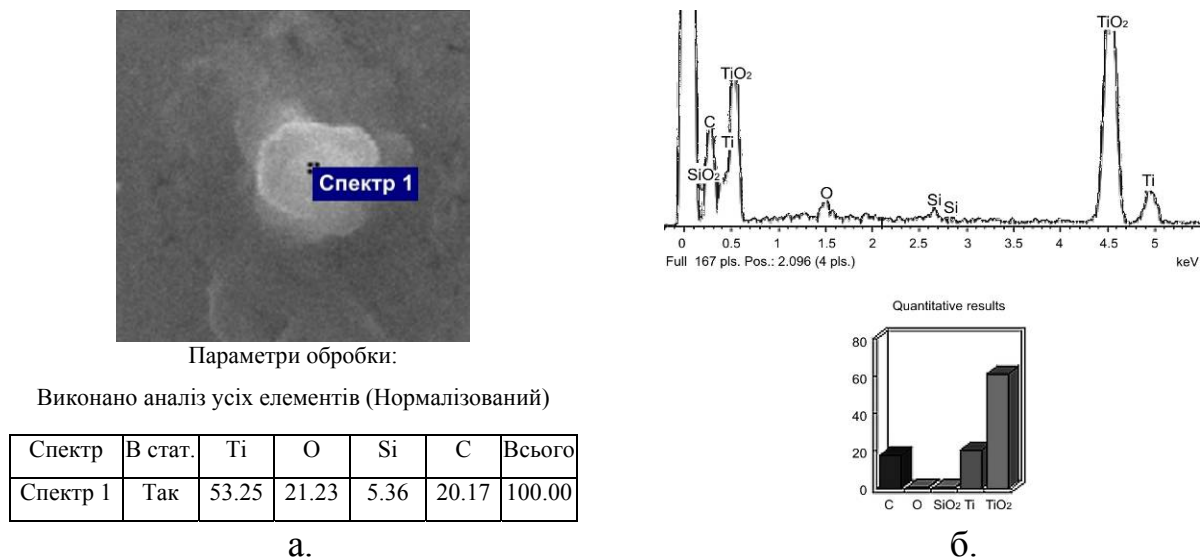


Рисунок Б.18 – Результати рентгенофлуоресцентного (а, прилад: “S1 Titan”) та дифрактометричного (б, прилад: “D8 Fabline”) аналізу кремнієвого зонду, поверхня якого модифікована тонким покриттям TiO_2

Таким чином, представлені технологічні основи виготовлення та результати випробовування зондів АСМ, які є універсальними і дозволяють проводити комплексний контроль та корегувати технічні параметри автоматизованої системи. При цьому, комплексні дослідження характеристик пристроїв МСТ проводяться з високою точністю, чутливістю та відтворюваністю.

ДОДАТОК В

Документація про наукову значимість, практичне використання
та впровадження основних результатів роботи

Національна академія наук України

National Academy of Sciences of Ukraine

ІНСТИТУТ НАДТВЕРДИХ
МАТЕРІАЛІВ імені В. М. БАКУЛЯ

04074, Київ-74, вул. Автозаводська, 2

V. BAKUL INSTITUTE FOR
SUPERHARD MATERIALS

2, Avtozavods'ka Str., Kyiv, 04074

телефон: 4688632, факс: (044) 4688632, 4688625, E-mail: secretar@ism.kiev.ua

Одержувач: Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, код ЄДРПОУ 05417377, б/р № 35216093005279, р/р № 35221293005279 в Управлінні державної казначейської служби України в Оболонському р-ні м. Києва, МФО 820172, ІПН 054173726549, Св. ПДВ 100203406 Є неприбутковою організацією

14.08.18 № 18 - 22

На № _____

ДОВІДКА

про практичну цінність матеріалів дисертаційної роботи
**«Розвиток методів та засобів атомно-силової мікроскопії для
 неруйнівного контролю характеристик компонентів
 мікросистемної техніки»**

БОНДАРЕНКА МАКСИМА ОЛЕКСІЙОВИЧА

Дисертаційна робота Бондаренка М. О. присвячена удосконаленню існуючих та створенню нових методів і засобів атомно-силової мікроскопії для контролю характеристик компонентів мікросистемної техніки і представляє собою наукові основи підходів до керування якістю неруйнівного контролю на основі методу атомно-силової мікроскопії. Гнучке керування якістю контролю матеріалів і виробів з них методами атомно-силової мікроскопії базується на вдосконаленні їх апаратного забезпечення.

В дисертаційній роботі Бондаренка М. О. розроблена автоматизована система вимірювання і контролю характеристик досліджуваних поверхонь, що містить удосконалені системи позиціонування лазерного променя на зонд атомно-силового мікроскопу та видалення залишкового трибоелектричного заряду блоку контролю.

Це дозволяє гнучко керувати робочими режимами контролю, а також збільшити механічну (в тому числі акустичну та вібраційну) і теплову стабільність процесу контролю методом атомно-силової мікроскопії.

Автоматизована система для неруйнівного контролю на базі атомно-силової мікроскопії апробована нашим Інститутом при дослідженні геометричних та механічних характеристик поверхонь інструментів з композиційних матеріалів на основі кубічного нітриду бору і показала високу надійність та ефективність.

Заступник директора з наукової роботи
 Інституту надтвердих матеріалів
 ім. В.М. Бакуля НАН України,
 доктор технічних наук, професор



С.А. Клименко

Акт

про практичне використання та впровадження результатів
дисертаційного дослідження **Бондаренка Максима Олексійовича**

Результати досліджень, які представлені у дисертаційній роботі М. О. Бондаренка є актуальними та направлені на покращення точності, чутливості та відтворюваності результатів контролю, проведеного методом атомно-силової мікроскопії, в залежності від кліматичних факторів оточуючого середовища та робочих параметрів процесу контролю. Наукова новизна та практичні результати дисертації мають важливе прикладне значення для наукових та виробничих завдань нашої компанії.

Так, важливе науково-практичне значення має розроблений М. О. Бондаренком комплекс методик для вимірювального контролю наногеометрії та механічних характеристик поверхонь матеріалів на основі атомно-силової мікроскопії. Особливу зацікавленість представляють авторські методики, що містять оригінальні ідеї (способи оцінки мікротвердості та зносостійкості захищені патентами України на корисну модель №87907, №117635) та дозволяють формувати панорамні зображення контрольованої ділянки з високою роздільною здатністю та деталізацією фрагментів її топології.

Результати, отримані М. О. Бондаренком мають практичне значення для компанії ООО «Мелітек-Україна» і спрямовані на розвиток засобів вимірювального контролю, що впроваджується в різноманітні галузі української промисловості. Також ці результати можуть зацікавити науково-дослідні організації та підприємства, що займаються розробкою та дослідженням компонентів пристроїв мікросистемної техніки та є клієнтами нашої компанії.

На даний час компанією ООО «Мелітек-Україна» проводяться роботи з питання узгодження характеристик приладів контролю геометричних та механічних характеристик поверхонь в нанометрових діапазонах з існуючими методиками, для чого практично використовуються тест-об'єкти виготовлені на оптичному кварцовому склі комбінованою технологією електронно-променевого модифікування, запропонованою в дисертаційному дослідженні М.О. Бондаренка.

Генеральний директор
компанії ООО «Мелітек-Україна»,
кандидат технічних наук



О. В. Верцанова

ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН
«УКРОБОРОНПРОМ»



STATE CONCERN
«UKROBORONPROM»

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
НАУКОВО- ВИРОБНИЧИЙ
КОМПЛЕКС «ФОТОПРИЛАД»

STATE ENTERPRISE
RESEARCH AND PRODUCTION
COMPLEX «PHOTOPRYLAD»

вул. Б. Вишневецького, 85, м. Черкаси, 18000
тел./факс (0472) 45-12-75, (0472) 37-45-31
тел. (0472) 36-03-08
E – mail: oaspu@photopribor.ck.ua

85, B. Vyshnevetsky St., Cherkasy, 18000
tel./fax (0472) 45-12-75, (0472) 37-45-31
tel. (0472) 36-03-08
E – mail: oaspu@photopribor.ck.ua

№ _____
на № _____ від _____

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
БОНДАРЕНКА МАКСИМА ОЛЕКСІЙОВИЧА
у виробничий процес Державного підприємства
Науково-виробничий комплекс «Фотоприлад»

Дійсний акт констатує, що в умовах Державного підприємства Науково-виробничий комплекс «Фотоприлад» були впроваджені обчислювальні алгоритми та пакет програм для дослідження та контролю стану поверхні, морфології та фізико-механічних характеристик, елементів виробів точного оптико-електронного приладобудування, які виготовляються в ДП НВК «Фотоприлад», а також для їхньої ідентифікації та встановлення метрологічного ресурсу роботи цих елементів.

Розроблені Бондаренком М.О. алгоритмічне та програмне забезпечення дозволяє оцінити швидкодію дослідження стану, морфології, фізико-механічних характеристик елементів оптико-електронних приладів, лазерних систем для визначення терміну їх експлуатації, а також точність та ефективність визначення оптимальних, граничних та критичних параметрів процесу контролю із застосуванням методу атомно-силової мікроскопії.

Впровадження алгоритмічного та програмного забезпечення дозволяє підвищити точність процесу контролювання стану, морфології та фізико-механічних характеристик елементів оптико-електронних приладів та лазерних систем (дзеркала, фільтри, призми та ін.), які виготовляються ДП НВК «Фото-

прилад» на 10-15%, а також підвищити швидкість проведення цього процесу на 35-40%. Це в свій час дозволило зменшити брак вихідної продукції, що дає річний економічний ефект в розмірі до 200 тис. грн.. на рік.

Насьогодні в ДП НВК «Фотоприлад» розглядається питання використання даного програмного продукту в процесі контролювання стану, морфології, фізико-механічних характеристик елементів спеціального призначення, медичної техніки та комунікаційного зв'язку (коліматори, лінзи, призми, дзеркала тощо).

Заступник генерального директора з науки —
Головний конструктор, д.т.н., с.н.с.



В.І.Гордієнко

РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ

від впровадження результатів дисертаційної роботи

«Розвиток методів та засобів атомно-силової мікроскопії

для неруйнівного контролю характеристик компонентів мікросистемної техніки»

Бондаренка Максима Олексійовича, представленої на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 «Прилади і методи контролю та
визначення складу речовин»

В дисертаційній роботі створені нові конструкторсько-технологічні рішення, спрямовані на вдосконалення методів та засобів атомно-силової мікроскопії для дослідження характеристик елементів оптико-механічних приладів та лазерних систем.

Передане для впровадження алгоритмічне та програмне забезпечення можна оцінити як інтелектуальну власність, мінімальна вартість якої (без врахування витрат на матеріали та додаткове обладнання) могла б бути розроблена ЦКБ «Сокіл» фахівцем на рівні провідного інженера з окладом 6 000 грн. протягом двох років досліджень з врахуванням додаткової заробітної плати, загально виробничих витрат, адміністративних витрат складає 200 000 грн.

Таким чином, економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи Бондаренка М.О. складає 200 000 грн.

**СТРУКТУРА ЦІНИ
НА НАУКОВО-ТЕХНІЧНУ ПРОДУКЦІЮ
по ЦКБ "СОКІЛ" (станом на 14.02.2017)**

№ п/п	Статті витрат	Всього, грн	
1	Сировина та матеріали		
2	Покупні та комплектуючі вироби		
4	Основна заробітна плата	6 000,00	
5	Додаткова заробітна плата	1 584,00	26,4%
6	Відрахування на соціальні заходи	1 668,48	22%
7	Витрати на службові відрядження	0,00	
8	Паливо та енергія на технологічні цілі	0,00	79%
9	Загальновиробничі витрати	6 900,00	115%
10	Витрати на роботи, що виконують сторонні організації	0,00	
11	Виробнича собівартість	16152,48	
12	Виробнича собівартість (без врахування вартості покупних та комплектуючих виробів, робіт, що виконують сторонні організації)	0,00	
13	Адміністративні витрати	1 140,00	19%
14	Витрати на збут	0,00	1,4%
15	Загальна собівартість	17 292,48	
16	Прибуток	4 845,74	30%
17	Ціна	22 138,22	
18	ПДВ	4 427,64	20%
19	Разом	26 565,87	

при серед. з/п = 6000,00 грн. за місяць.



**ПУБЛІЧНЕ
АКЦІОНЕРНЕ
ТОВАРИСТВО
"УКРП'ЄЗО"**

вул. Сумгайтська, 10, м. Черкаси, 18016, Україна
Телефон: +38(0472) 66-16-10, 66-65-36
Факс: +38(0472) 360300
Веб-сайт: <http://www.ukrpiezo.by.ru>

**ПУБЛИЧНОЕ
АКЦИОНЕРНОЕ
ОБЩЕСТВО
"УКРПЬЕЗО"**

ул. Сумгайтская, 10, г. Черкасы, 18016, Украина
Телефон: +38(0472) 66-16-10, 66-65-36
Факс: +38(0472) 360300
Веб-сайт: <http://www.ukrpiezo.by.ru>

«17» 05 2017 р. № 283
на № _____ від «____» _____ 20__ р.

ДОВІДКА

**про наукову значимість, практичне використання і впровадження
результатів експериментальних досліджень дисертаційної роботи Бондаренка
Максима Олексійовича на тему: «Розвиток методів та засобів атомно-силової
мікроскопії для неруйнівного контролю характеристик компонентів
мікросистемної техніки»**

Результати наукових досліджень, що виконані Бондаренком М.О. мають важливе наукове та практичне значення для нашого підприємства, де використовуються для визначення механічних властивостей кварцових пластин під елементи виробів мікросистемної техніки, що знайшли застосування в точному приладобудуванні та функціональній електроніці.

Автором запропоновано комплексний метод математичної обробки результатів визначення нанорельєфу та фізико-механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки. Завдяки цьому методу можна мінімізувати артефакти сканування, уніфікувати інформацію про стан поверхні та проводити обмін з іншими інформаційно-аналітичними системами математичної обробки

результатів досліджень методом атомно-силової мікроскопії, і який покладено в основу створення віртуальної лабораторії нанометричних випробувань.

Так, в результаті математичної обробки результатів експериментальних досліджень механічних характеристик (мікротвердості, зносостійкості, внутрішніх механічних напружень, тощо) кварцових пластинах, що використовуються на нашому підприємстві в різноманітних елементах виробів мікросистемної техніки (резонаторах кварцових УРК02, мікрогенераторах ГК21-ТК, фільтрах УФП2П6-10,0М-2,7К), яка включає: усунення нахилу поверхні, фільтрацію отриманих даних, усунення артефактів сканування, та інше, були отримані високоточні та якісні топограми поверхні, а також спрогнозовано терміну експлуатації таких виробів. Таке своєчасне та оперативне діагностування поверхневих дефектів, а також усунення відхилень експлуатаційних показників від діапазону заданих значень дозволяє зменшити кількість браку продукції на етапі її виготовлення та підвищити термін надійної експлуатації виробів.

В цілому сукупність наукових досліджень та розробок в рамках дисертаційної роботи Бондаренка М.О. можна розглядати, як вирішення важливої науково-технічної проблеми, отримання рішення якої дозволяє з високою точністю, чутливістю та відтворюваністю проводити неруйнівний контроль геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки, а також тонких покриттів на них.



Г. К. Мовсіков

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

о научной и практической значимости результатов исследований
директора научно-исследовательского института
Черкасского государственного технологического университета,
к.т.н., доцента **Бондаренко Максима Алексеевича**
для расширения функциональных возможностей атомно-силовой микроскопии
при диагностике физико-механических характеристик материалов точного
приборостроения

Создание и изучение новых материалов, применяемых в современных технологических процессах и точном приборостроении, является актуальной проблемой в таких отраслях, как микроэлектроника, микрооптика, микрооптомеханика, аддитивные нанотехнологии и прочих. Наряду с разработкой новых материалов, в последнее время все больше внимания уделяется изучению морфологии и физико-механических характеристик поверхностей этих материалов, поскольку они оказывают существенное влияние на технико-эксплуатационные и функциональные показатели элементов приборов.

Оценка эффективности применения таких материалов невозможна без привлечения современных метрологических средств исследования состояния и физико-механических характеристик их поверхностей на нанометрическом уровне. Среди множества методов и устройств неразрушающего контроля особое место имеют оборудование и методики атомно-силовой микроскопии (АСМ). Значительное расширение функциональных возможностей в последнее время связано с тем, что методы АСМ позволяют формировать трехмерное изображение рельефа поверхности, а также получать уникальную информацию о строении и состоянии поверхности; проводить картирование ее морфологии, определять деформационно-прочностные и релаксационные свойства, как всей поверхности, так и ее отдельных структурных элементов. Это, в свою очередь, предоставляет возможность получить более полную информацию о состоянии и морфологии поверхности материалов, а также позволит прогнозировать срок их надежной эксплуатации.

Однако, несмотря на то, что современные АСМ имеют большое количество измерительных режимов, их практическое применение при исследовании механических свойств выявило ряд недостатков, ограничивающих возможности эффективного использования этого метода. Среди них стоит выделить недостаточное разрешение метода при определенных режимах сканирования, сложность интерпретации результатов исследования, сложность привязки измерений к определенному положению на поверхности.

Таким образом, для совершенствования и создания новых средств АСМ автором были разработаны научные основы диагностики физико-механических характеристик перспективных материалов точного приборостроения, являющиеся важными для науки и практики и основанные на теоретическом обобщении известных результатов и исследовании новых подходов к решению сформулированных задач.

Результаты, полученные Бондаренко М.А. позволяют расширить функциональные возможности, повысить точность, надежность и быстродействие метода АСМ и направлены на диагностирование физико-механических характеристик перспективных материалов, которое производится в одном цикле сканирования и позволяет прогнозировать параметры эксплуатации.

К числу важных научных результатов, полученных автором, и представляющих интерес для нашей организации, можно отнести следующее:

- научно обоснована концепция расширения функциональных возможностей метода атомно-силовой микроскопии для повышения точности, надежности и быстродействия процесса диагностирования материалов применяемых в области точного приборостроения;
- разработаны методы физико-химических исследований; методы математического моделирования и решены численно-аналитические задачи оптимизации; создан испытательный стенд, предназначенный для определения в реальных и экстремальных условиях параметров микрогеометрии и физико-механических характеристик материалов, чем обеспечивается уменьшение уровня погрешности измерения этих характеристик;
- обоснованы оптимальные рабочие режимы работы атомно-силового микроскопа и даны практические рекомендации для высокоточного, надежного и оперативного диагностирования состояния, морфологии и физико-технических характеристик поверхностей;
- уточнен механизм взаимодействия зондов АСМ с поверхностями различных материалов в реальных условиях на этапах подвода зонда, сканирования и отвода зондов от исследуемой поверхности, в котором учтены силовые и энергетические параметры, что положено в основу разработки обобщенной модели процесса диагностирования поверхностей материалов.

Для практического использования полученных результатов исследований М. А. Бондаренко были предложены комплекс методик, вычислительные алгоритмы и пакет программ для исследования микрорельефа, структуры, физико-механических характеристик и идентификации материалов, а также определения метрологического ресурса работы измерительного инструмента и снижения инструментальной погрешности. Разработаны новые многокритериальные экспериментально-статистические модели для определения срока надежной эксплуатации материалов путем прогнозирования степени их деградации со временем, по которым установлены закономерности комплексного влияния внешних условий и параметров сканирования на точность и надежность результатов исследования состояния, морфологии и физико-механических характеристик.

Бондаренко М. А. на основе теоретических и экспериментальных исследований разработаны методические рекомендации «Комплексная метрологическая аттестация материалов точного приборостроения методом АСМ», которые были внедрены и подтверждены актами внедрения на ряде предприятий Украины (ГПНПК «Фотоприбор» (г. Черкассы), ПАО «Укрпъезо» (г. Черкассы) и за рубежом (ОДО «Микротестмашины» (г. Гомель, Беларусь) с целью усовершенствования контроля качества элементов приборов точного приборостроения, предназначенных для измерения и контроля объектов различной физической природы, что позволило повысить точность измерения методом атомно-силовой микроскопии микрорельефа поверхности; уменьшить количество выходов из строя элементов приборов, как в нормальных, так и в экстремальных условиях; увеличить вероятность их работоспособности и надежности в этих условиях в 1,3...2,1 раза; повысить срок службы в 2,6...3,5 раза; уменьшить время диагностирования в реальных условиях на 30-50%; получить экономический эффект.

Нашей организацией планируется использование результатов, полученных М. А. Бондаренко при проектировании технических средств нанодиагностики на базе методов атомно-силовой микроскопии.

Зав. лабораторией нанотехнологий и нанопроцессов
Института тепло- и массообмена им А.В. Лыкова
НАН Беларуси,
академик, д.т.н., профессор

С.А. Чижик

Личную подпись Чижика С.А.
(фамилия, инициалы)
удостоверяю
начальник отдела кадров
управления кадров и кадровой политики
аппарата НАН Беларуси
(подпись) Кузьмина
(инициалы, фамилия)
20



Осн. 2000 г. • УНП 490001529

Общество с дополнительной ответственностью «Микротестмашины»

ул. Тельмана 44 к. 6, 246003 г. Гомель, Беларусь
Тел. / Факс: +375 232 715463 • Моб. +375 29 6774642
E-mail: microtm@mail.ru • Internet: http://microtm.com

исх. №2 от 10.01.2014 г.

на № от

АКТ

производственных испытаний кремниевых зондов CSC38,
модифицированных тонким углеродным покрытием.

Мы, нижеподписавшиеся, с одной стороны: руководители работ д.т.н., профессор, зав. кафедры физики Черкасского государственного технологического университета Ващенко В.А.; к.т.н., доцент Черкасского государственного технологического университета Бондаренко М.А.; к.т.н., доцент Черкасского государственного технологического университета Яценко И.В.; соискатели научной степени кандидата технических наук Черкасского государственного технологического университета Билоконь С.А., Коваленко Ю.И. и с другой стороны: директор ОДО «Микротестмашины» (г. Гомель, Беларусь) к.т.н. Суслов А.А. на основании договора о Международном научно-техническом сотрудничестве от 14.10.2003 г. составили настоящий акт в том, что за период с 27.10.13 г. по 05.01.14 г. в производственных условиях ОДО «Микротестмашины» с помощью атомно-силового микроскопа «NT-206V» проведены сравнительные испытания зондов CSC38, модифицированных функциональным покрытием путем термовакuumного осаждения углеродной пленки (толщиной менее 8 нм) с ее дальнейшей электронной обработкой в одном технологическом цикле.

Испытания модифицированных зондов проводилось на тестовых структурах TGZ1 с дальнейшим контролем их точности измерений, длительности надежной эксплуатации и повторяемости результатов сканирования.

В результате испытаний установлено, что модификация зондов тонким углеродным покрытием позволила увеличить точность измерений нанорельефа поверхности на 7...10%; повысить длительность надежной эксплуатации на 40...60 минут; увеличить повторяемость результатов в 1,4...3,4 раза.

Отдельные образцы зондов используются в ОДО «Микротестмашины» для проведения циклов комплексных испытаний нанорельефа и физико-механических характеристик поверхностей на атомно-силовом микроскопе «NT-206V».

Директор ОДО «Микротестмашины»

А.А. Суслов

Научный руководитель работ

В.А. Ващенко

Ответственный исполнитель работ

М.А. Бондаренко

Научный сотрудник

И.В. Яценко

Соискатель ЧГТУ

С.А. Билоконь

Соискатель ЧГТУ

Ю.И. Коваленко



Акт

о практическом использовании и внедрении в производственные процессы ОДО “Микротестмашины” (г. Гомель, Беларусь) результатов диссертационной работы Бондаренко Максима Алексеевича

Исследования, проводимые М. А. Бондаренко направлены на усовершенствование инструментальной базы для проведения комплексных нанометрических исследований методом сканирующей зондовой микроскопии. В результате анализа физических процессов, происходящих при взаимодействии зондов для атомно-силовой микроскопии с исследуемыми поверхностями, а также путем изучения и минимизации лимитирующих факторов такого взаимодействия получены данные, позволяющие значительно улучшить точность и повысить воспроизводимость процесса измерения, что имеет большое научное и практическое значение для разработок в области атомно-силовой микроскопии, внедряемых на нашем предприятии. Эти результаты были использованы для изготовления универсального измерительного инструмента, обеспечивающего помимо улучшения точности и воспроизводимости результатов измерений также и механическую (в том числе тепловую и вибрационную) стабильность процесса диагностирования на уровне порядка 0,1 нм, предотвращение артефактов сканирования.

По результатам проведенных М.А. Бондаренко теоретико-экспериментальных исследований разработаны методические рекомендации, при использовании которых на нашем предприятии повышается точность измерения методом атомно-силовой микроскопии микрорельефа поверхности на 53...66%, воспроизводимость измерений в 1,5...1,7 раза, повышается долговечность измерительных элементов на 30...48%, а также минимизируются артефакты измерения микрорельефа и физико-механических характеристик исследуемой поверхности.

Директор ОДО “Микротестмашины”



А. А. Суслов

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Ректор Черкаського державного
технологічного університету,

к.н. з держ. управ., доцент

 О. О. Григор

«10» 09 2018 р.

АКТ

впровадження в навчальний процес

Черкаського державного технологічного університету

результатів дисертаційної роботи **Бондаренка Максима Олексійовича**

на тему: "Розвиток методів та засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю характеристик компонентів мікросистемної техніки"

Комісія у складі: голови – першого проректора, к.т.н., доцента Ланських Є.В. і членів комісії: декана факультету електронних технологій і робототехніки, к.т.н., доцента Гончарова А.В., декана факультету комп'ютеризованих технологій машинобудування і дизайну, к.т.н., доцента Підгорного М.В., декана факультету інформаційних технологій і систем, к.т.н., доцента Трегубенко І.Б., завідувача кафедри фізики, д.т.н., професора Ващенко В.А., завідувача кафедри робототехніки та спеціалізованих комп'ютерних систем, д.т.н., професора Лукашенко В.М., завідувача кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій, к.т.н., доцента Бондаренко Ю.Ю. склала даний акт про те, що наступні результати дисертаційних досліджень Бондаренка М.О. впроваджені в навчальний процес при виконанні курсових і дипломних проектів, при викладанні лекцій, проведенні лабораторних та практичних занять з навчальних дисциплін («Фізика», «Біофізика і біомеханіка», «Матеріалознавство та конструкційні матеріали», «Основи тепло- та променевої техніки», «Основи наукових досліджень та техніка експерименту», «Нанотехнології в медичному приладобудуванні», «Методи підвищення метрологічних характеристик приладів контролю та визначення складу речовини», «Інтелектуальні технології вимірювання», «Технічні засоби для дослідження впливу кліматичних факторів»):

- механізм силової та енергетичної взаємодії мікро- і наноінструментарію з поверхнями матеріалів в реальних умовах;

- методологія проведення теоретичних та експериментальних досліджень, яка включає: сучасні методи фізико-хімічних досліджень; методи математичного моделювання та чисельно-аналітичні методи задач оптимізації; випробувальний стенд, що призначений для визначення в реальних та екстремальних умовах параметрів мікрогеометрії та механічних характеристик матеріалів;
- практичні рекомендації щодо високоточного, надійного і оперативного діагностування геометричних та механічних характеристик перспективних матеріалів та визначення їх терміну надійної експлуатації;
- багатокритеріальна експериментально-статистична модель комплексного впливу кліматичних факторів та параметрів сканування на точність та відтворюваність результатів контролю мікрорельєфу, мікротвердості та зносостійкості матеріалів для визначення терміну їх надійної експлуатації шляхом прогнозування ступеня деградації цих матеріалів з часом.

Крім цього в навчальному процесі використовуються наступні монографії, навчальний посібник і підручник:

- Основи біофізики і біомеханіки [Текст]: підруч. / В.С.Антонюк, М.О.Бондаренко, В.А.Ващенко, Г.В.Канашевич, Г.С.Тимчик, І.В.Яценко. – К.: «Політехніка», 2012. – 346 с. (Гриф надано МОН України. Лист від 14.12.2010 р. – № 1/П-11366).
- Основи теплоперенесення в елементах оптичного приладобудування [Текст]: навч. посіб. / В.А.Ващенко, В.С.Антонюк, Г.С.Тимчик, І.В.Яценко, М.О.Бондаренко, О.В.Кириченко, М.П.Рудь. – К.: «Політехніка», 2012. – 435 с. (Гриф надано МОН України. Лист від 13.10.2011 р. – № 1/П-9520).
- Методи та засоби мікроскопії [Текст]: моногр. / В.С.Антонюк, Г.С.Тимчик, Ю.Ю.Бондаренко, П.П.Петльований, С.О.Білокінь, М.О.Бондаренко. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 336 с.
- Мікроскопія в нанотехнологіях [Текст]: моногр. / В.С.Антонюк, Г.С.Тимчик, О.В.Верцанова, Ю.Ю.Бондаренко, С.О.Білокінь, М.О.Бондаренко. – К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 260 с.
- Біофізика в задачах і прикладах [Текст]: навч. посіб. / В.С.Антонюк, Г.С.Тимчик, М.О.Бондаренко, В.А.Ващенко, Ю.Ю.Бондаренко, С.О.Білокінь, А.М.Рубан. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 208 с.
- Покриття у приладобудуванні [Текст]: моногр. / В.С.Антонюк, Г.С.Тимчик, Ю.Ю.Бондаренко, Ю.І.Коваленко, М.О.Бондаренко, Р.П.Гайдаш – К.: «Політехніка», 2016. – 360 с.

- Контроль параметрів якості функціональних покриттів [Текст]: моногр. / В.С.Антонюк, Г.С.Тимчик, Ю.Ю.Бондаренко, С.О.Білокінь, С.П.Ральченко, В.О.Андрієнко, М.О.Бондаренко – К.: НТТУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. – 396 с.

Використання студентами і аспірантами результатів дисертаційної роботи Бондаренка М.О. дозволяє їм на більш високому науково-технічному рівні виконувати дипломні проекти, магістерські роботи та кандидатські дисертації.

Голова комісії:

Перший проректор,

к.т.н., доцент

 Є. В. Ланських

Члени комісії:

Декан факультету електронних

технологій і робототехніки,

к.т.н., доцент

 А. В. Гончаров


Декан факультету комп'ютеризованих
технологій машинобудування і дизайну,

к.т.н., доцент

 М. В. Підгорний


Декан факультету інформаційних
технологій і систем,

к.т.н., доцент

 І. Б. Трегубенко


Завідувач кафедри фізики,

д.т.н., професор

 В. А. Ващенко

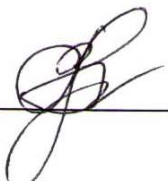
Завідувач кафедри робототехніки та
спеціалізованих комп'ютерних систем,

д.т.н., професор

 В. М. Лукашенко

Завідувач кафедри приладобудування,
мехатроніки та комп'ютеризованих технологій,

к.т.н., доцент

 Ю. Ю. Бондаренко

Затверджую



Декан приладобудівного факультету
Національного технічного університету
України "Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського",
доктор технічних наук, професор

 Г. С. Тимчик

" 24 " 09 2018 р.

Акт

практичного використання результатів дисертаційної роботи

Бондаренка Максима Олексійовича

"Розвиток методів та засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю характеристик компонентів мікросистемної техніки"

в навчальному процесі Національного технічного університету України

"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Ми, що підписались нижче, заступник декана з методичної роботи кандидат технічних наук, доцент Філіппова Марина В'ячеславівна, виконуючий обов'язки завідувача кафедри виробництва приладів кандидат технічних наук, доцент Шевченко Вадим Володимирович, вчений секретар кафедри Матвієнко Сергій Миколайович, склали цей акт про те, що результати дисертаційної роботи кандидата технічних наук, доцента кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету Бондаренка Максима Олексійовича **"Розвиток методів та засобів атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю характеристик компонентів мікросистемної техніки"** використовуються в навчальному процесі кафедри виробництва приладів приладобудівного факультету Національного технічного університету "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", а саме: при читанні лекцій, проведенні лабораторних і практичних занять, виконанні курсових проектів з навчальних дисциплін "Методологія наукових досліджень", "Наноматеріали та покриття у приладобудуванні", "Теорія та практика експериментальних досліджень", "Основи метрології та інформаційно-виміральної техніки", "Технологія приладобудування",

"Діагностика та надійність автоматизованих систем" в яких використовуються наступні науково-технічні результати дисертаційної роботи: методологічні основи проведення контролю нанометричних об'єктів та структур; методики по визначенню наногеоμεтриї, мікротвердості та зносостійкості матеріалів; пакет програм для дослідження мікрорельєфу, стану поверхні, механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки, а також для встановлення метрологічного ресурсу роботи зондів атомно-силових мікроскопів та зниження їх інструментальної похибки тощо.

Також у навчальному процесі використовуються результати дисертаційної роботи викладені в монографіях:

- Методи та засоби мікроскопії [Текст]: моногр. / В.С.Антонюк, Г.С.Тимчик, Ю.Ю.Бондаренко, П.П.Петльований, С.О.Білокінь, М.О.Бондаренко. – К.: НТУУ "КПІ", 2013. – 336 с;
- Мікроскопія в нанотехнологіях [Текст]: моногр. / В.С.Антонюк, Г.С.Тимчик, О.В.Верцанова, Ю.Ю.Бондаренко, С.О.Білокінь, М.О.Бондаренко. – К.: НТУУ "КПІ", 2014. – 260 с;
- Контроль параметрів якості функціональних покриттів [Текст]: моногр. / В.С.Антонюк, Г.С.Тимчик, Ю.Ю.Бондаренко, С.О.Білокінь, С.П.Ральченко, В.О.Андрієнко, М.О.Бондаренко – К.: "КПІ ім. Ігоря Сікорського", 2018. – 396 с.

Використання студентами і аспірантами науково-технічних результатів дисертаційної роботи Бондаренка М. О. дозволяє їм детально ознайомитися та освоїти навички проведення наукових експериментів, а також сучасні методи та засоби атомно-силової мікроскопії для неруйнівного контролю характеристик компонентів мікросистемної техніки в нанометрових діапазонах.

Заступник декана приладобудівного факультету
НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського" з методичної роботи,
кандидат технічних наук, доцент

М. В. Філіппова

Завідувач кафедри виробництва
приладів НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського"
кандидат технічних наук, доцент

В. В. Шевченко

Вчений секретар кафедри виробництва
приладів НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського"

С. М. Матвієнко

ДОДАТОК Г

Інструкція по роботі з програмою для обробки інформації з автоматизованої системи контролю

Опис та принцип роботи програми. Інструкція по роботі з програмою допоможе користувачу (оператору) освоїти роботу автоматизованої системи контролю методом АСМ та допоможе проводити налаштування, вибір оптимальних режимів, обрання правильного матеріалу та налагодити роботу у віддалено-дистанційному режимі.

Після включення приладу (у нашому випадку АСМ “NT-206”), запуску драйверів роботи приладу та програмного модулю автоматизованої системи контролю перед очима оператора представляється основний вигляд головного меню програми, рисунок Г.1.

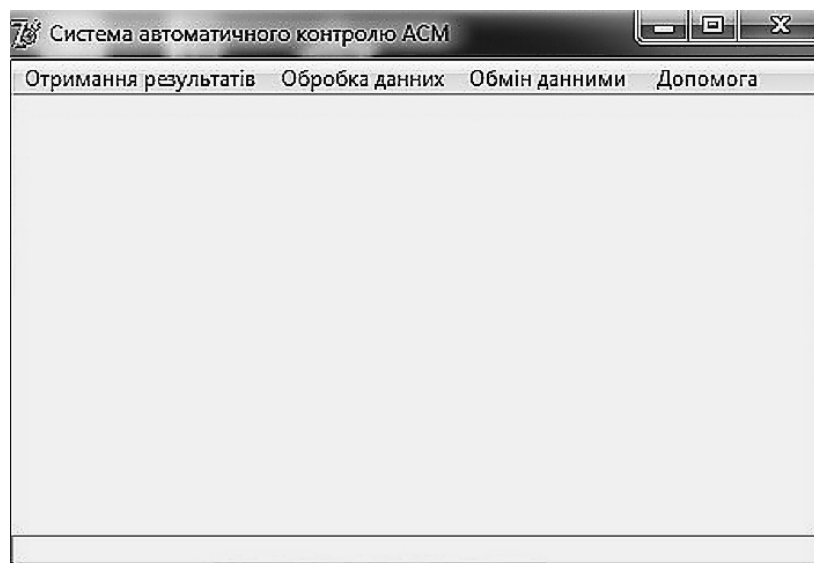


Рисунок Г.1 – Загальний вигляд інтерфейсу програми після запуску

В головному меню у оператора представляється вибір одного із чотирьох пунктів, кожен із яких містить від 2 до 4 підпунктів, рисунок Г.2.

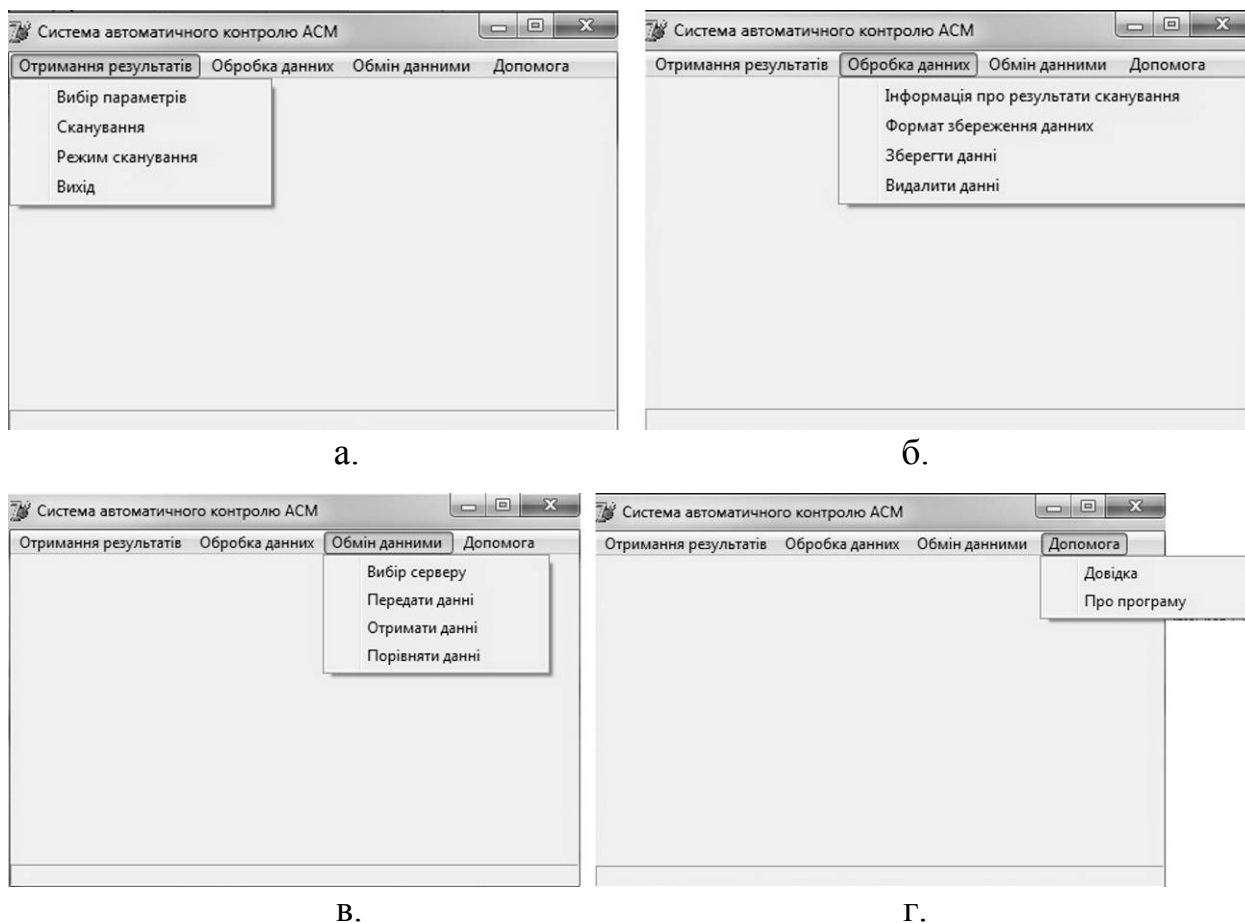


Рисунок Г.2 – Результат вибору одного із пунктів головного меню програми:
 а – пункт меню “Отримання результатів”; б – пункт меню “Обробка даних”;
 в – пункт меню “Обмін даними”; г – пункт меню “Допомога”

Пункти головного меню складені в такій послідовності, щоб оператору було зручно з ергономічної точки зору працювати з програмою. Так, логічна та послідовна структура програми нагадує більшість спеціалізованих програмних продуктів призначених для роботи з ACM: “Surface Explorer”, “Gwidonn”, “NanoScan” тощо.

В той же час, робочі модулі програми не перенасичені специфічною інформацією, що відносяться до налаштування сервісних та налагоджувальних функцій, чим не дозволяє оператору збити системні налаштування та призвести до системної критичної помилки програми. Цим реалізовується простота управління та підвищується надійність роботи приладу.

При обранні пункту меню “Вибір параметрів” (рис.Г.3) виводиться окреме вікно “Вибір параметрів сканування”.

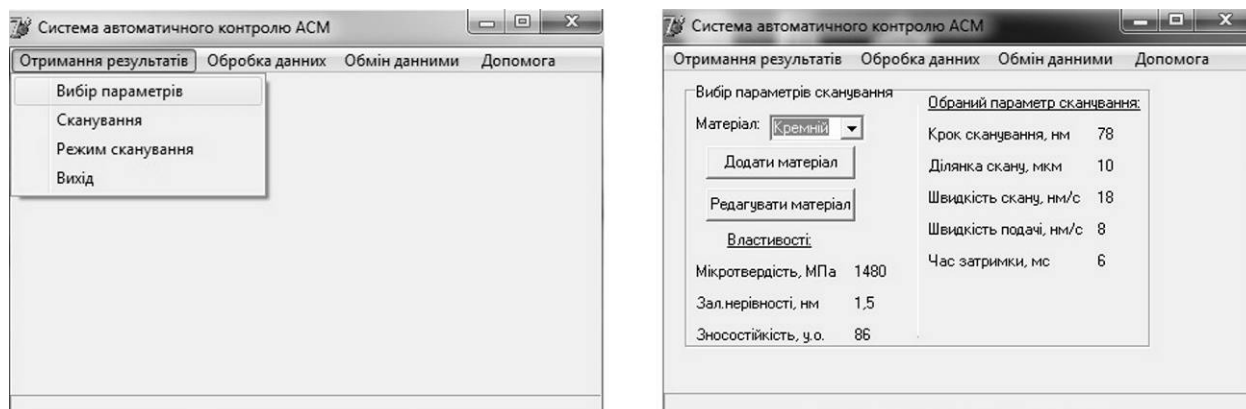


Рисунок Г.3 – Загальний вигляд інтерфейсу меню “Вибір параметрів”

У вікні “Вибір параметрів сканування” є можливість обрання матеріалу, що сканується (за умови, що він відомий) із меню, що випадає “Матеріал”, дані для якого отримуються з бази даних підключеного сервера (за умови, що сервер підключено до автоматизованої системи контролю), або обираються із стандартних матеріалів (початкові дані обрано для кремнію марки Кр0). Дане вікно дозволяє уручну вводити та редагувати досліджувані матеріали шляхом натискання відповідних кнопок. Паралельно у вікні виводяться дані про властивості матеріалів та раніше обрані оптимальні параметри сканування. Ці дані вводяться за умови обрання пункту меню “Додати матеріал”, або “Редагувати матеріал”. Серед основних властивостей матеріалів слід виділити такі: мікротвердість (МПа), залишкові мікронерівності (нм) та відносна зносостійкість (0 – 100). Серед основних параметрів сканування оператор може обрати такі: крок сканування (5 – 100 нм); ділянка сканування (2×2, 10×10, 13×13 мкм); швидкість сканування (0,5 – 100 нм/с); швидкість подачі п’єзосканеру (15 – 50 нм/с); час затримки (1 – 100 мс). Параметри сканування обираються виходячи із власного досвіду оператора абозначається із бази даних для даного матеріалу, що зберігається на зовнішньому сервері.

Для додавання нового матеріалу в базу даних необхідно натиснути кнопку додати матеріал і заповнити усі запропоновані бланки. Зміна даних з

вибраним матеріалом відбувається по натисканні на кнопку “Редагувати матеріал”.

Обрання пункту меню “Сканування зразка” (рис.Г.4) запускає драйвер системи сканування АСМ, яка, в свою чергу, запускає процедуру сканування зразка за раніше обраним режимом.

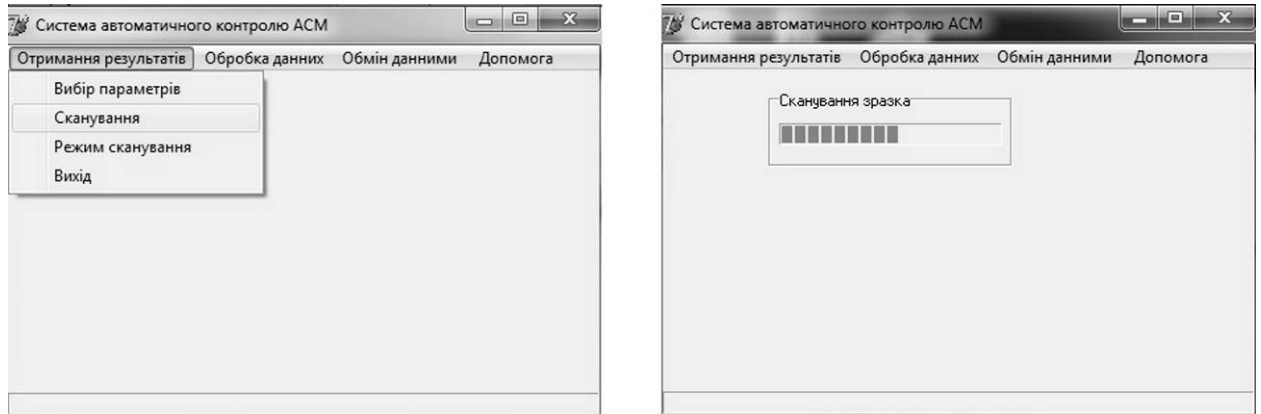


Рисунок Г.4 – Загальний вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування при обранні пункту меню “Сканування”

Вибір режиму сканування (рисунок Г.5). На даному етапі належить обрати один із чотирьох можливих режимів проведення дослідження, а саме: одностороннє сканування, коли зондом буде проведено одностороннє сканування обраної ділянки в заданому діапазоні поля сканування за заданих параметрів.

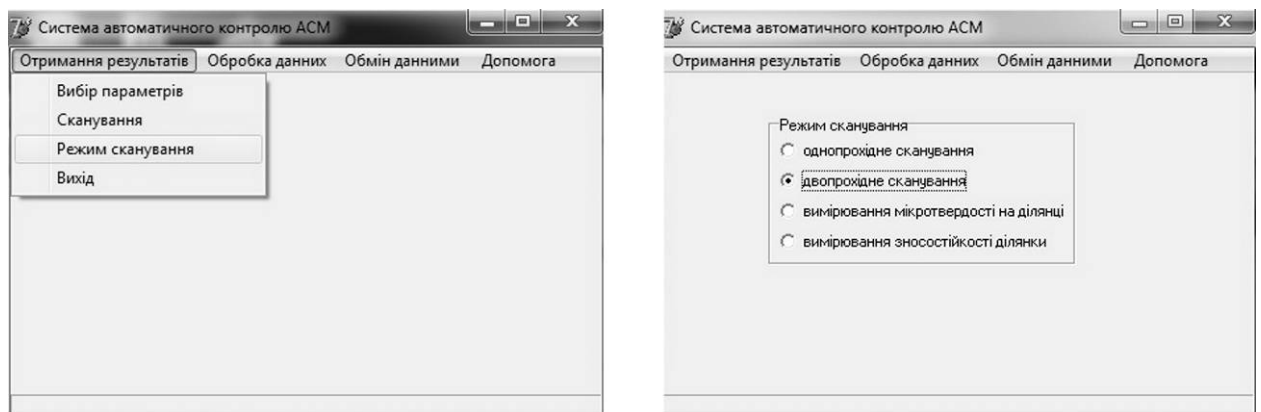


Рисунок Г.5 – Загальний вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування при обранні пункту меню “Режим сканування”

Обравши двопрохідне сканування проводиться сканування обраної

ділянки в заданому діапазоні поля сканування за заданих режимів в прямому та зворотному напрямках, що збільшує на 80 – 120% час сканування, проте покращує точність результатів дослідження на 15 – 25%. Визначення мікротвердості на ділянці – по-суті є чергуванням послідовного однопрохідного сканування, з подальшим наноідентуванням в обраній точці і, далі – знову проводиться однопрохідне сканування для визначення реальних розмірів ділянки проколювання поверхні з урахуванням навалів матеріалу та пружного (релаксаційного) його відновлення; вимірювання зносостійкості ділянки – чергування послідовного однопрохідного сканування, “дряпання” ділянки та визначення коефіцієнту зносостійкості за методом склерометрії, з подальшим однопрохідним скануванням для визначення коефіцієнту тертя та критерію зносостійкості матеріалу (визначення критерію зносостійкості методом склерометрії із залученням АСМ здійснюється умовно – за порівнянням з критерієм зносостійкості алмазу, який становить 100 у.о).

При обранні пункту меню “Інформація про результати сканування” (рис.Г.6) виводиться відповідне вікно в якому відображається статус сканування (надпис “OK!” у випадку безпроблемного сканування та в процесі, якщо дані отримуються на час виведення інформації), час сканування, який, в залежності від обраного режиму та параметрів сканування, може знаходитися в діапазоні 93 с (для “швидкого” однопрохідного сканування) та 350 с – для визначення мікротвердості.

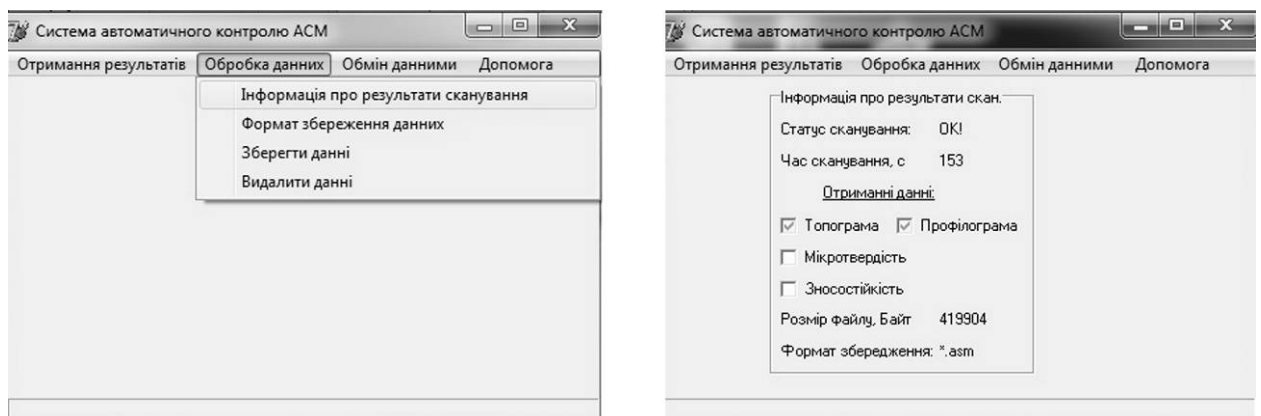


Рисунок Г.6 – Загальний вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування при обранні пункту меню “Інформація про результати сканування”

В графі “Отримані дані” виводяться результати сканування та збереження даних, а саме: отримані результати (топограма, профілограма, значення вимірюваних мікротвердості та/або зносостійкості), розмір файлу в якому зберігаються дані (зазвичай, у форматі *.asm це значення складає 419904 байт) та формат у якому збережені на диск отримувані дані.

Пункт меню "Формат збереження даних" (рисунк Г.7) дозволяє обрати формат у якому файл буде збережений на диск. Серед форматів обирають такі:

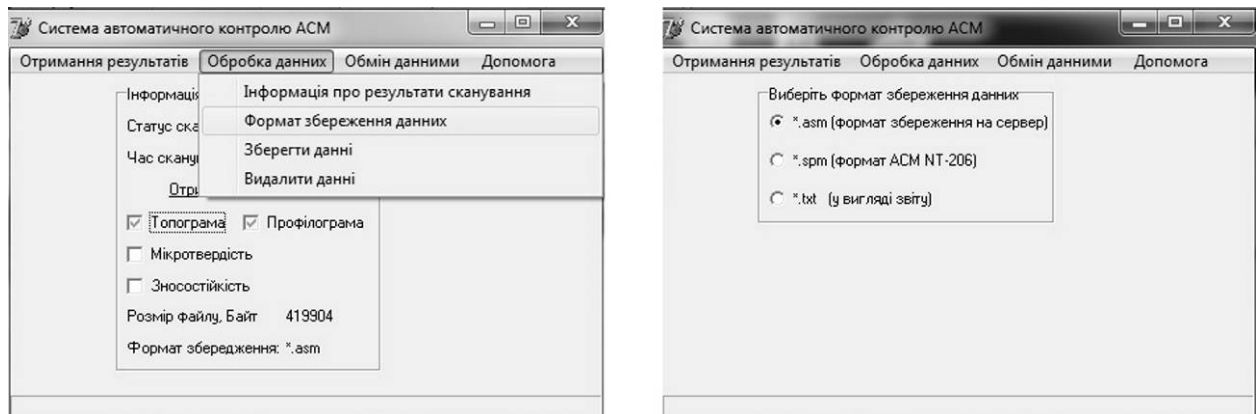


Рисунок Г.7 – Загальний вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування при обранні пункту меню "Формат збереження даних"

– *.asm – стандартний формат збереження даних (в цьому форматі дані зберігаються на сервері даних) – фактично містить інформацію про топограму поверхні (у вигляді двовимірної матриці даних), карту розподілу мікронерівностей поверхні лазерним променем та карту розподілу латеральних сил по поверхні;

– *.spm – формат збереження даних у форматі придатному для отримання на приладі “NT-206” та обробки у стандартному пакеті “SurfaceExplorer”;

– *.txt – дані зберігаються у вигляді звіту для подальшої обробки в табличних редакторах (наприклад, “Excel Microsoft”) і несуть доступні до розуміння оператора дані про координати матриці даних, значень вимірної мікротвердості та зносостійкості, гістограми тощо.

Програма зчитує файли з можливістю подальшої обробки для інших виробників мікроскопів, наприклад: “Digital Instruments” (DI), “Omicron Nanotechnology”, “RHK Technology”, “Park Scientific”, “TopoMatrix”, “Molecular Imaging”, тощо, що дозволяє уніфікувати дані отримані на пристрої за допомогою розробленої програми в інших програмних додатках для обробки даних АСМ. В розробленій програмі є також можливість завантаження в програму і обробку зображень форматів *.psx, *.pgm, *.jpg.

Слід зауважити, що при збереженні даних на сервер вони зберігаються у спеціалізованому форматі даних.

Збереження результатів сканування на диск проводиться обранням пункту меню “Зберегти дані” (рисунк Г.8).

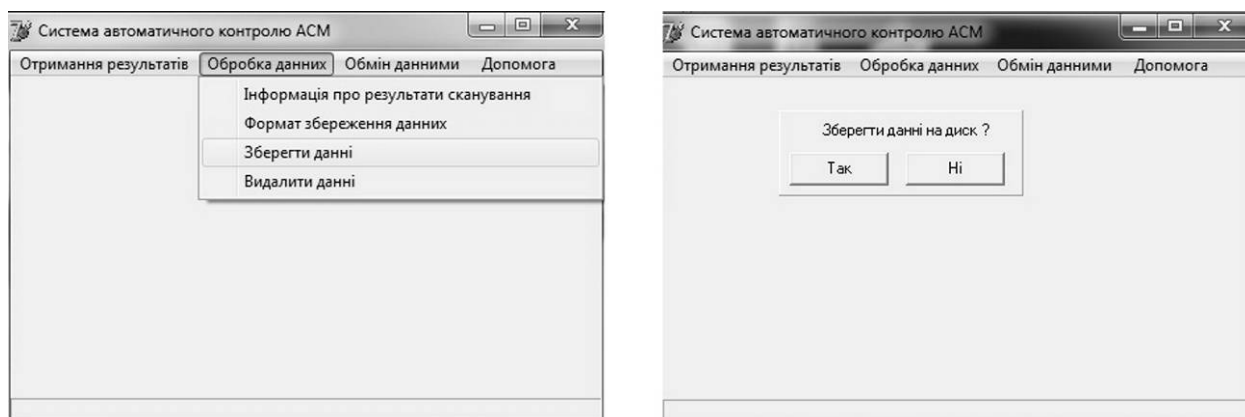


Рисунок Г.8 – Загальний вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування при обранні пункту меню “Зберегти дані”

Остаточне збереження даних на диск відбувається при підтвердженні інформації про збереження даних натисканням кнопки “Так”. Збереження даних підтверджується написом “Data were saved to disc!” в інформаційному (статусному) вікні програми.

Для видалення результатів сканування (наприклад, коли отримані неякісні результати з великою кількістю артефактів, або обрана невірна ділянка на якій відбувалося сканування) необхідно обрати пункт меню “Видалити дані” (рисунк Г.9). Остаточне видалення даних відбувається при підтвердженні інформації про видалення даних натисканням кнопки “Так”. Видалення даних підтвердиться написом “Data were deleted!” в

інформаційному вікні програми.

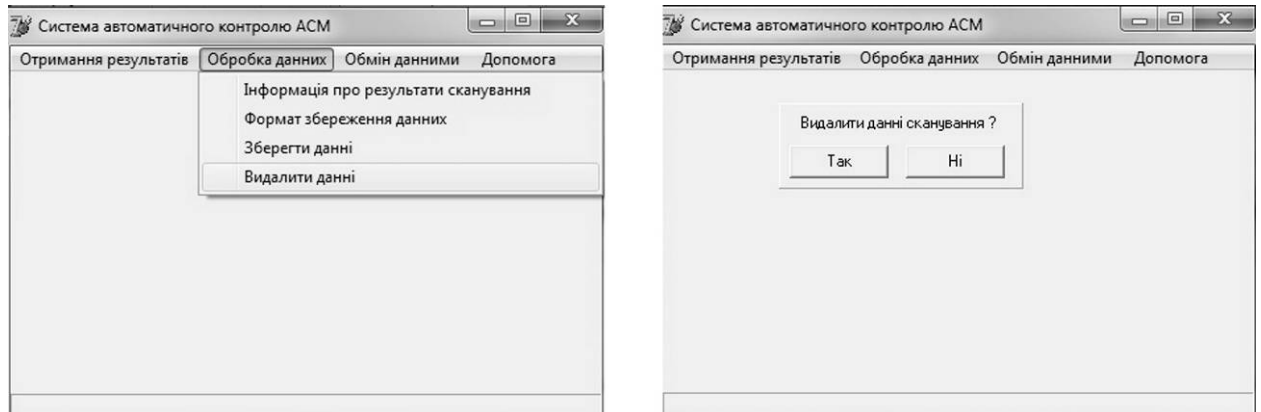


Рисунок Г.9 – Загальний вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування при обранні пункту меню “Видалити дані”

Для вибору адреси серверу на який будуть зберігатися дані необхідно обрати пункт меню “Вибір серверу” (рисунок Г.10).

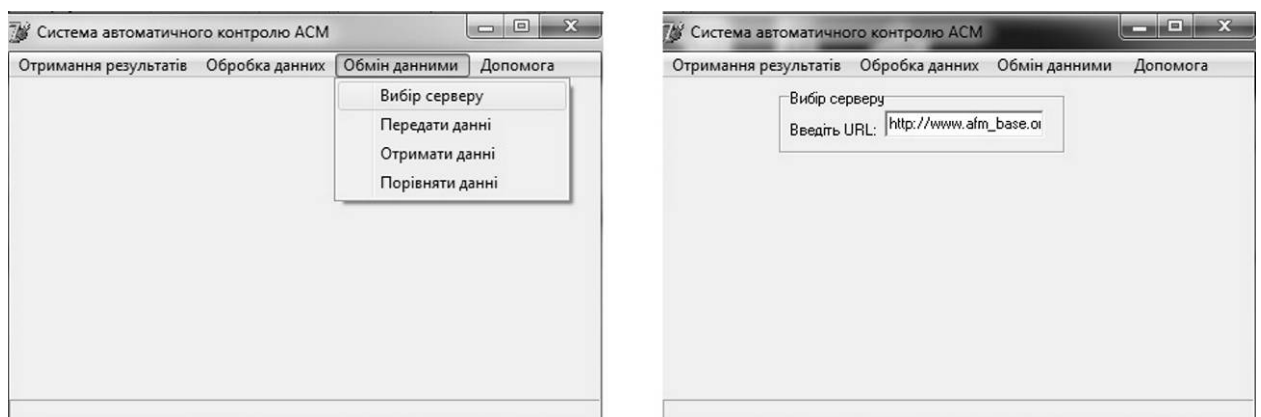


Рисунок Г.10 – Загальний вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування при обранні пункту меню “Вибір серверу”

Вибір серверу проводиться обиранням URL-адреси або IP-адреси у віконці “Введіть URL:”. Введення правильної адреси та позитивний результат підключення до мережі Інтернет (серверу збереження даних) дублюється відкриттям відповідного вікна серверу даних у браузері, який за умовчужанням встановлений на комп’ютері та підтвердиться написом “Connection OK!” в інформаційному (статусному) вікні програми.

У пункті меню “Передати дані” (рисунок Г.11) відбувається пересилання на сервер даних про матеріал, обраний в пункті меню “Вибір параметрів сканування”, а саме: отримані шляхом сканування основні

характеристики матеріалу, обрані режими сканування даного матеріалу, а також отримані топограми, профілограми та гістограми, дані про мікротвердість та зносостійкість цих матеріалів. Коректність отриманих даних підтверджується виведенням вікна з написом “Дані передано”, що підтверджується натисканням кнопки “ОК!”.

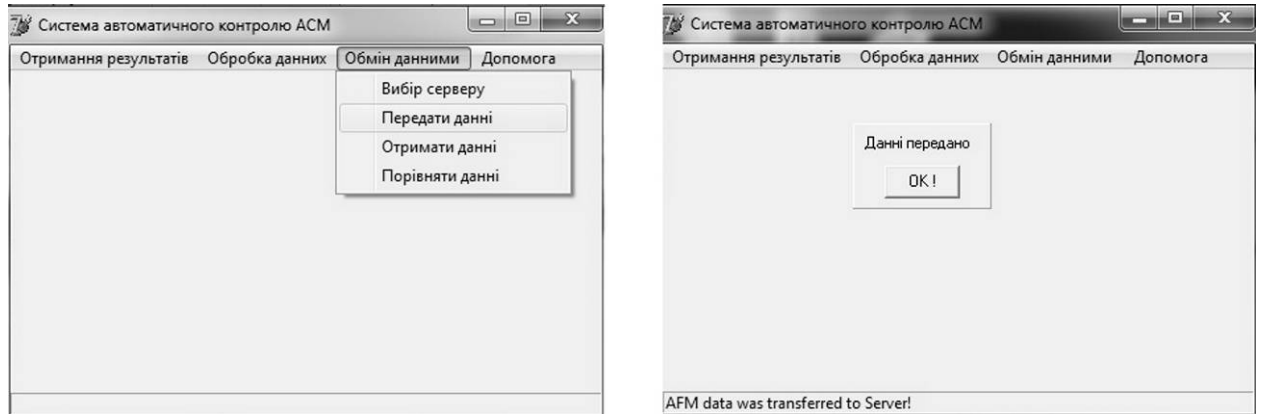


Рисунок Г.11 – Загальний вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування при обранні пункту меню “Передати дані”

Коректне отримання даних підтвердиться написом “AFM data was transferred to Server!” в інформаційному (статусному) вікні програми.

У пункті меню “Отримати дані” (рис. Г.12) відбувається отримання даних про матеріал, обраний в пункті меню "Вибір параметрів сканування": отримуються основні характеристики матеріалу, оптимальні режими сканування даного матеріалу, а також характерні (еталонні) топограми, профілограми та гістограми, дані про мікротвердість і зносостійкість цих матеріалів.

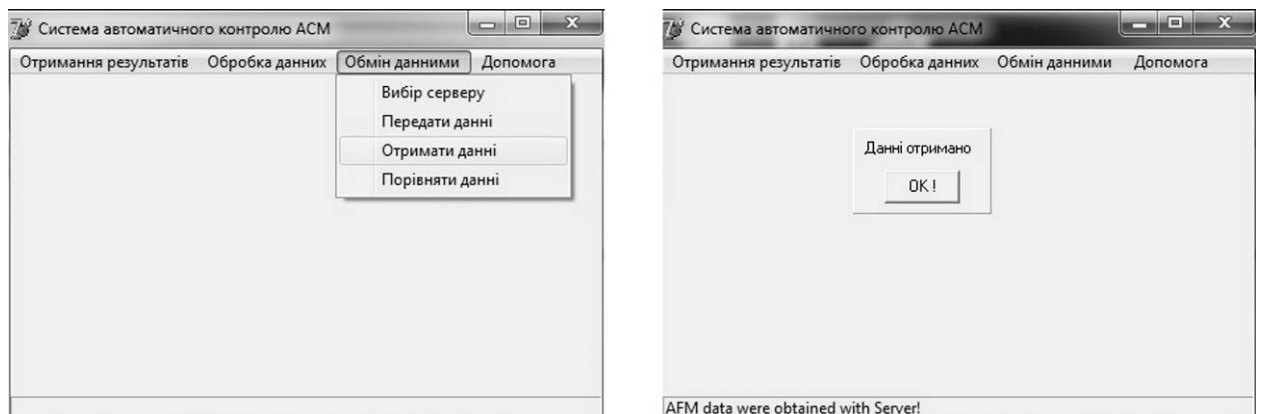


Рисунок Г.12 – Загальний вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування при обранні пункту меню “Отримати дані”

Коректність отриманих даних підтверджується виведенням вікна з написом “Дані отримано”, що підтверджується натисканням кнопки “ОК!”.

Коректне отримання даних підтвердиться написом “AFM data were obtained with Server!” в інформаційному (статусному) вікні програми.

Пункт меню “Порівняти дані” (рисунок Г.13) дозволяє порівнювати та корегувати інформацію, отриману за допомогою АСМ з даними раніше збереженими на сервері даних.

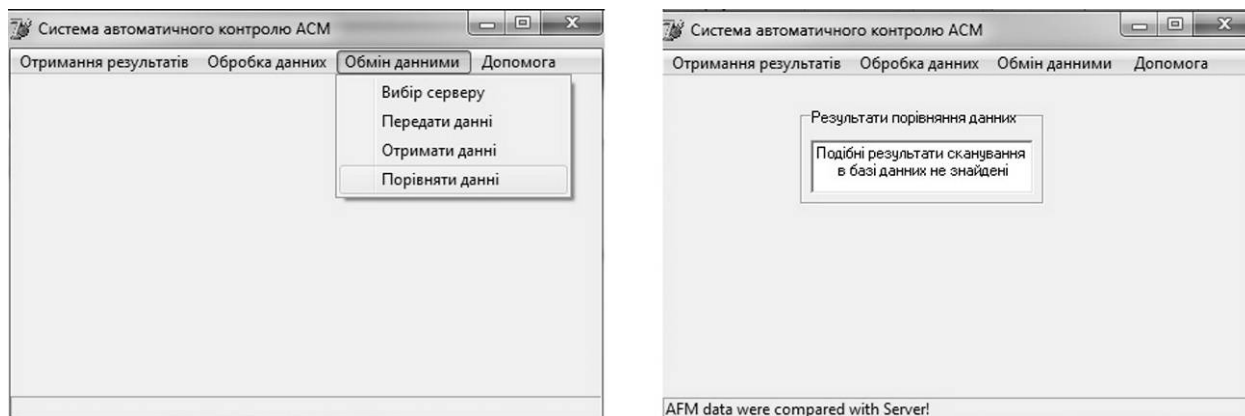


Рисунок Г.13 – Загальний вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування при обранні пункту меню “Порівняти дані”

Коректність порівняння даних наводиться у вигляді інформаційного вікна, що підтверджується оператором в основній формі програми.

Коректне з’єднання з сервером, отримання та порівняння даних (як результативне, так і не результативне, див.рис.313) підтвердиться написом “AFM data were compared with Server!” в інформаційному вікні програми.

В пункті меню “Довідка” (рис. Г.14) наводиться анотована інформація про можливості програми та короткий опис основних меню програми.

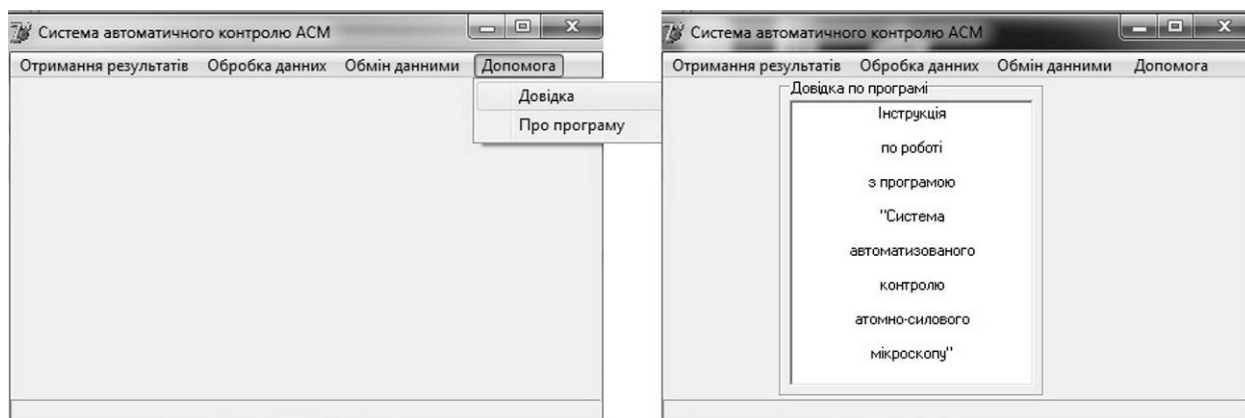


Рисунок Г.14 – Загальний вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування при обранні пункту меню “Довідка”

В пункті меню “Про програму” (рис. Г.15) наводиться інформація про розробника програми.

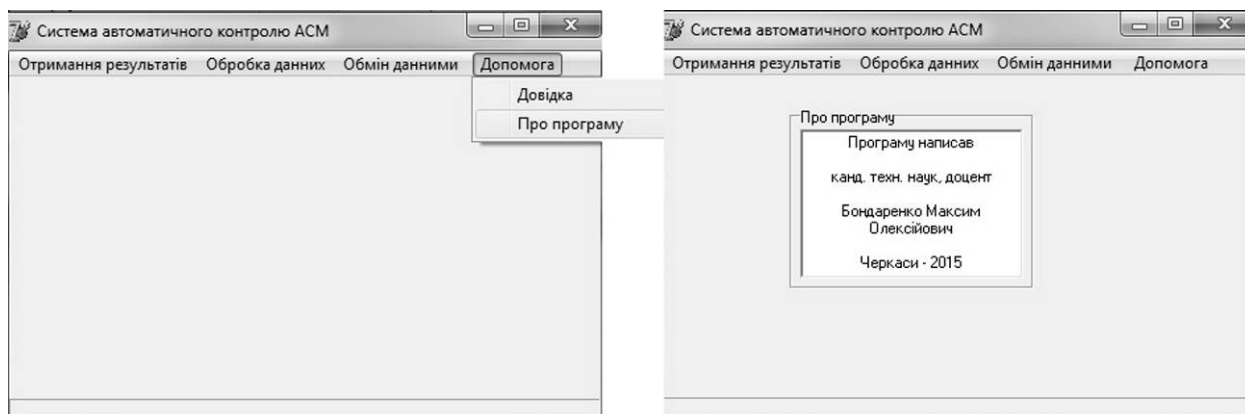


Рисунок Г.15 – Загальний вигляд інтерфейсу системи автоматизованого керування при обранні пункту меню “Про програму”

Для закінчення роботи з програмою слід натиснути кнопку “Вихід”, або обрати відповідний пункт меню.

ДОДАТОК Д

Визначення похибок при контролі геометричних та механічних характеристик компонентів мікросистемної техніки

Як відомо із роботи, в процесі визначення характеристик пристроїв МСТ методом АСМ можна виділити наступні похибки, що виникають у блоці контролю (рис.Д.1).

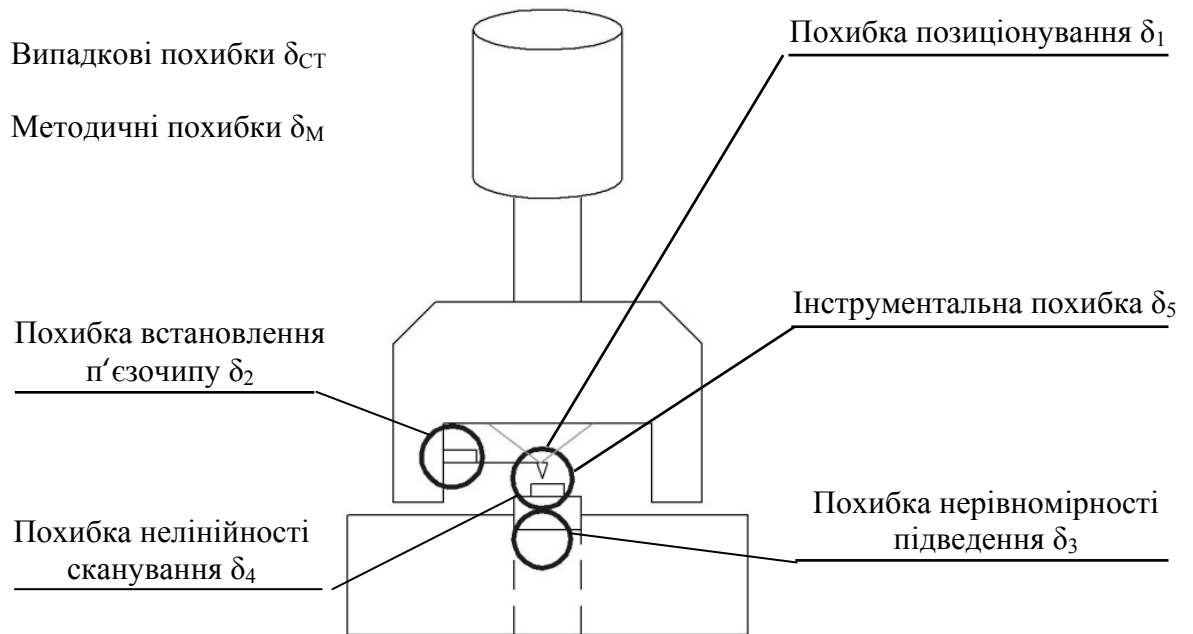


Рисунок Д.1 – Похибки, що виникають у блоці контролю АСМ

Похибка позиціонування (δ_1) – виникає на консолі зонду при налаштуванні системи лазерного фотодетектування, рис.Д.2:

$$\delta_1 = 1 - \left(\frac{(l - \Delta x)^2}{l^2} + \alpha \frac{\Delta x}{l} \right), \quad (\text{Д.1})$$

де l – довжина консолі, мкм; Δx – зміщення лазерного променя відносно вільного краю консолі, мкм; α – конструкційний коефіцієнт – відношення зміщення лазерного променя від краю консолі при дії максимального

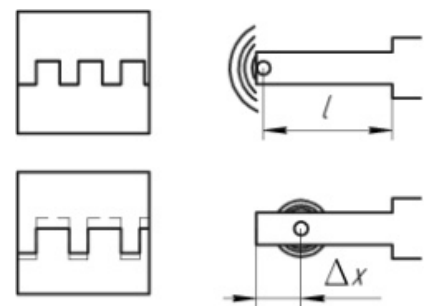


Рисунок Д.2 – Схема до визначення похибки позиціонування

навантаження на консоль до різниці довжини консолі та зміщення за тих же

$$\text{умов, тобто } \alpha = \frac{\Delta x}{l - \Delta x} \bigg|_{P \rightarrow \max}.$$

Для зонду CSC38 значення цих параметрів: $l = 350 \pm 5$ мкм, $\alpha = 0,17$.

Похибка позиціонування відноситься до суб'єктивних похибок, оскільки є результатом індивідуальних особливостей бачення оператора приладу щодо правильності налаштування системи лазерного фотодетектування.

Мінімізація похибки полягає в необхідності високоточного позиціонування лазерного променя системи фотодетектування на дзеркальну фаску шириною $w = 13$ мкм, яка розташована на вільному кінці консолі. Із застосуванням розробленої за участю автора системи позиціонування лазерний промінь буде фокусуватися по краю фаски ($\Delta x = d/2 = 1,5$ мкм), де d – діаметр лазерного променя, $d = 3$ мкм. Тоді похибка позиціонування становить:

$$\delta_1 = 1 - \left(\frac{(350 - 1,5)^2}{350^2} + 0,17 \cdot \frac{1,5}{350} \right) = 0,0078.$$

Похибка встановлення п'єзочипу (δ_2) – виникає в пристрої фіксування п'єзочипу при заміні останнього в пристрої АСМ, рис.Д.3:

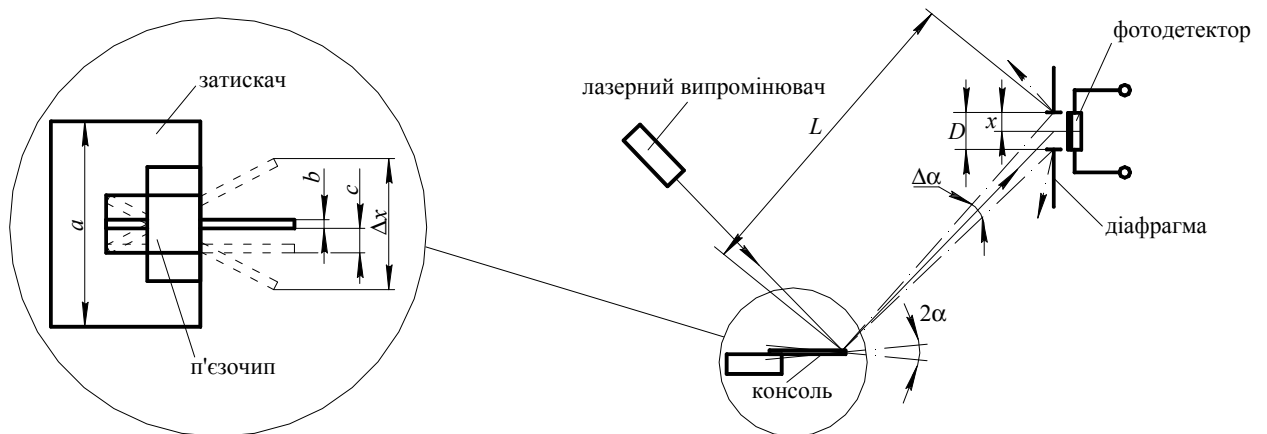


Рисунок Д.3 – Схема до визначення похибки встановлення п'єзочипу

$$\delta_2 = \frac{x - \Delta x}{x} + \frac{\alpha - \Delta \alpha}{\alpha}, \quad (\text{Д.2})$$

де D – діаметр фотоприймача; a – ширина затискача п'єзочипу; b – ширина консолі; c – зміщення п'єзочипу від центру затискача; α – максимальний кут

відхилення консолі; $x = D/2$ – максимальний хід лазерного променя на рівні фотодетектора; $\Delta x = \frac{D+a-b}{2} - c$ – мінімальне горизонтальне зміщення лазерного променя на рівні затискача; $\Delta\alpha = \frac{D}{2L}$ – максимальне кутове зміщення лазерного променя на фотодетекторі; L – відстань від консолі до фотоприймача. Для атомно-силового мікроскопу “NT-206” із зондами CSC38 та фотоприймачем SFH244S (виробник: “Siemens”, Німеччина), значення цих параметрів: $D = 8,2 \pm 0,1$ мм, $a = 4,8$ мм, $b = 0,0325$ мм, $\alpha = 11,6^\circ = 0,203$ рад, $L = 20$ мм.

Дана похибка, як і похибка позиціонування відноситься до суб’єктивних похибок. Позиціонування п’єзочипу в центрі затискача досягає максимальної точності із застосуванням спеціалізованого устаткування. При розрахунку похибки встановлення п’єзочипу будемо вважати зміщення п’єзочипу від центру затискача мінімальним. При цьому мінімальне горизонтальне зміщення лазерного променя на рівні затискача становитиме

$\Delta x = \frac{D-b}{2} = x - \frac{b}{2}$. Розрахункові параметри для визначення похибки:

$$x = \frac{8,1}{2} = 4,05 \text{ мм}; \Delta x = 4,05 - \frac{0,0325}{2} = 4,034 \text{ мм}; \Delta\alpha = \frac{8,1}{2 \cdot 20} = 0,2025 \text{ рад.}$$

Тоді, похибка встановлення п’єзочипу становитиме:

$$\delta_2 = \frac{4,05 - 4,034}{4,05} + \frac{0,203 - 0,2025}{0,203} = 0,004 + 0,0025 = 0,0065.$$

Похибка нерівномірності підведення зонду до зразка (δ_3) – виникає через нелінійність закону підведення зонду АСМ до досліджуваної поверхні (виникає в наслідок дії сил міжмолекулярної взаємодії атомів вістря зонду та досліджуваної поверхні), що веде до різкого, “стрибкоподібного” зміщення зонду до/від досліджуваної поверхні, рис.Д.4:

$$\delta_3 = 1 - ctg \beta, \quad (\text{Д.3})$$

де β - кут нахилу ділянки за якою визначається положення середньої лінії

профілю поверхні, $\operatorname{ctg} \beta = \frac{\Delta r}{\Delta F}$; Δr , ΔF – відповідно, максимальні відхилення відстані та сили взаємодії зонду АСМ з поверхнею на кривій підведення зонду до поверхні.

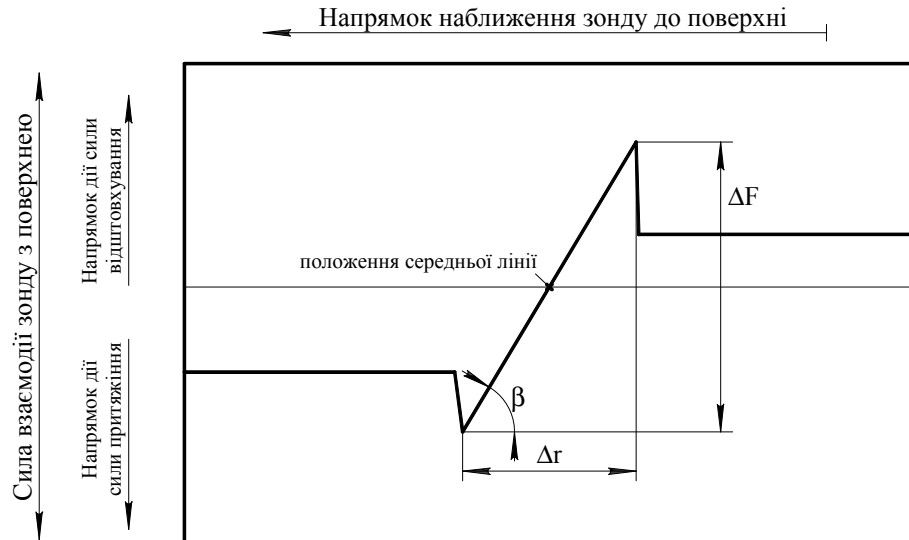


Рисунок Д.4 – Схема до визначення похибки нерівномірності підведення зонду до зразка

Таке зміщення зонду не дозволяє однозначно визначити середню лінію профілю поверхні, внаслідок чого значення максимально можливих глибини спадів та висоти виступів профілю досліджуваної поверхні відрізняються, що збільшує вірогідність виникнення поверхневих артефактів АСМ-зображення, рис.Д.5.

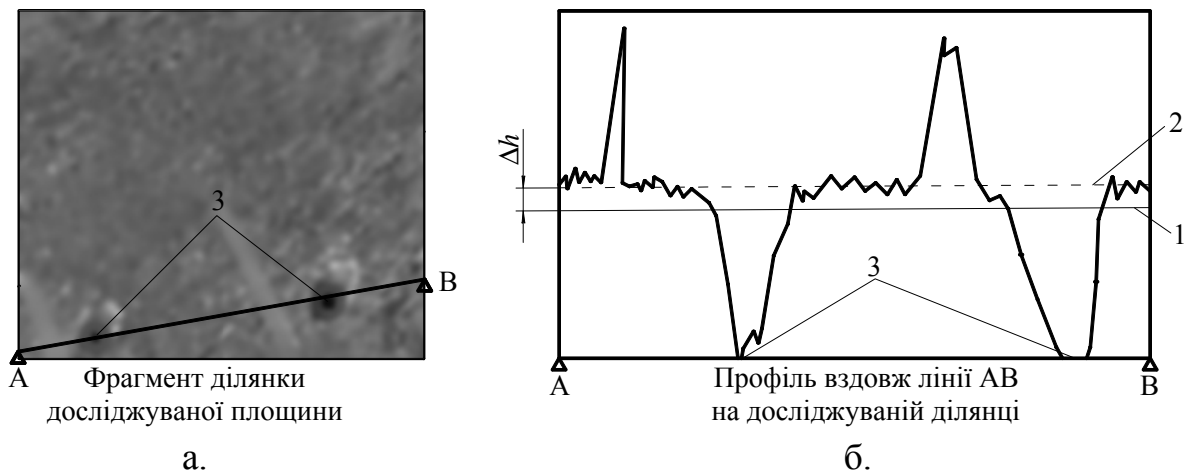


Рисунок Д.5 – АСМ-зображення досліджуваної поверхні (а) та профілограма зі зміщенням середньої лінії (б). Тут, поз.1 – середня лінія, змещена на Δh відносно свого дійсного значення (поз.2); поз.3 – поверхневі артефакти

Дана похибка відноситься до методичних похибок, оскільки програмний алгоритм автоматичного підведення зонду до поверхні та процедура визначення положення середньої лінії профілю поверхні, що пропонуються виробниками пристроїв АСМ є некоректними. Для мінімізації похибки та знаходження максимально наближення значення середньої лінії профілю до її дійсного значення, необхідно уникати нелінійність ділянки зміщення зонду відносно досліджуваної поверхні. Для цього знаходження положення середньої лінії профілю рекомендується визначати не в середині ділянки В-С (т.Е) кривої підведення зонду до поверхні, що з'єднує точку максимального відхилення зонду внаслідок дії сили притягнення (сили Лондона) з боку поверхні (т.В) та точку максимального відхилення внаслідок дії сили відштовхування (сили Ленарда-Джонса) (т.С), а в середині відрізка А-Д (т.Е), що з'єднує точку початку дії сили міжмолекулярного притягнення (сили Лондона) взаємодії між зондом та поверхнею (т.А) та точку, де дія сили Лондона та сили Ленарда-Джонса урівноважені (т.Д) (рис.Д.6).

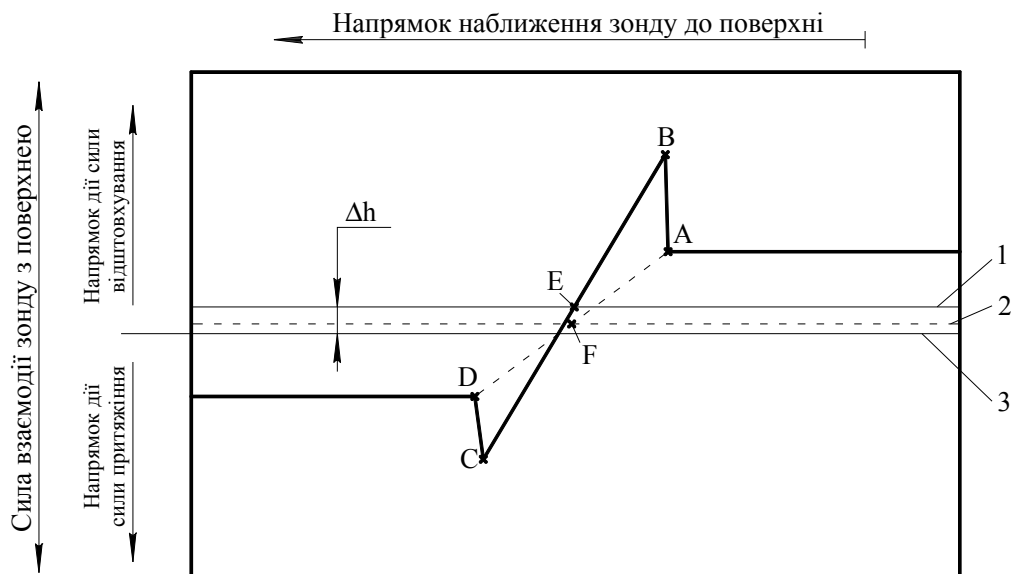


Рисунок Д.6 – Схема визначення похибки нерівномірності підведення зонду до зразка за кривою підведення зонду до поверхні: 1 – положення середньої лінії профілю визначене за пропозиціями виробників пристроїв АСМ; 2 – положення середньої лінії визначене за рекомендаціями автора; 3 – дійсне (ймовірне) положення середньої лінії; Δh – зміщення положення лінії 1 відносно свого дійсного значення 3

Враховуючи вищевказане, формулу (Д.3) та зіставивши дані з рис.5.6, встановлено, що максимальне наближення кута нахилу ділянки за якою визначається положення середньої лінії профілю поверхні до значення $\pi/4$ (при якому значення тангенса дорівнює 1) веде до зменшення похибки нерівномірності підведення зонду до зразка.

Проаналізувавши криві підведення зонду до поверхні, отримані за різних режимів та для різних матеріалів, автором встановлено, що значення кута нахилу ділянки В-С становило діапазон $\beta = 46-48^\circ$ (що відповідає похибці нерівномірності підведення зонду до зразка $\delta_3 = 0,034-0,1$), тоді, як для ділянки А-Д ці значення становили $\beta = 45-45,2^\circ$ (відповідна похибка нерівномірності підведення зонду $\delta_3 \leq 0,007$).

Похибка нелінійності сканування (δ_4) – виникає в результаті обробки та інтерпретації результатів сканування в пристроях, які використовують п'єзоелектричний сканер, що працює в полярній системі координат. При скануванні прямокутної ділянки поверхні досліджуваного зразка, п'єзоелектричний сканер рухається в певному секторі навколо своєї центральної осі. В міру наближення зонду до центру сканера (за умови, що кут повороту сканера не змінюється), довжина сектору вздовж якого відбувається сканування зменшується. Враховуючи, що кількість кроків сканування від ліній до лінії залишається незмінною, сам крок сканування також зменшується, і може становити для останньої лінії сканування 65-88% від значення кроку першої лінії сканування, рис.Д.7.

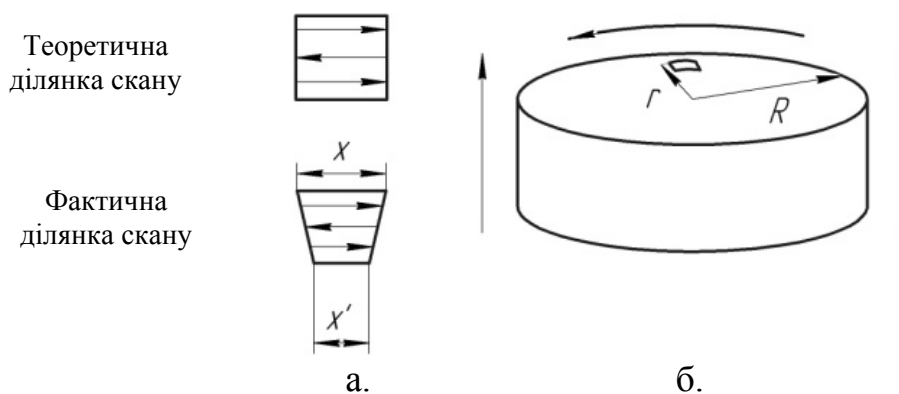


Рисунок Д.7 – Викривлення країв ділянки поверхні від сканованої АСМ (а)
та схема до визначення похибки нелінійності сканування (б)

Далі, в процесі програмної обробки АСМ-зображення, фрагмент сектору, відсканований пристроєм – перетворюється в прямокутне зображення. Це, як правило, веде до викривлення його країв. Особливо це помітно на зображеннях періодичних структур, рис.Д.8.

Для визначення такої похибки необхідно використати формулу:

$$\delta_4 = \frac{x - \Delta x}{x}, \quad (\text{Д.4})$$

де $\Delta x = x r / R$ - відносне зменшення довжини лінії сканування; x, x' – відповідно, більша та менша сторона сканованої ділянки; R – радіус п'єзосканеру (для пристрою “NT-206”, $R = 15$ мм); r – відстань від центру п'єзосканеру до сканованої ділянки.

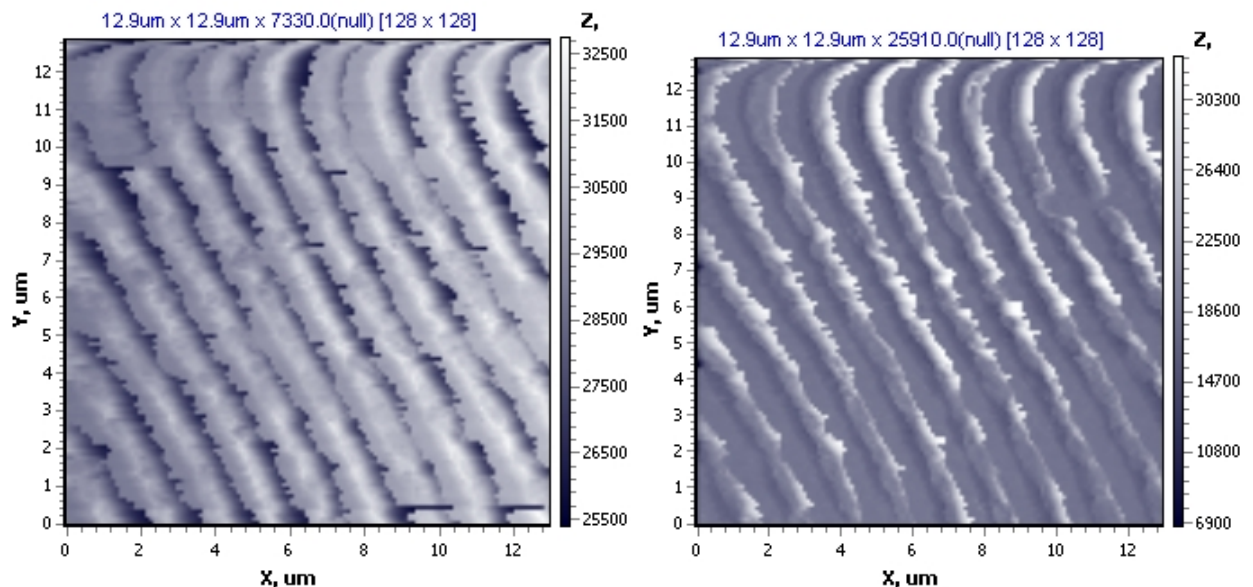


Рисунок Д.8 – Приклади проявлення похибки нелінійності сканування на АСМ-зображеннях періодичних структур (лінійна дифракційна ґратка сформована на оптичному склі К8 комбінованим термовакуумним методом)

Як і для випадку похибки нерівномірності підведення зонду до зразка, дана похибка відноситься до методичних похибок. Для її мінімізації необхідно максимально зменшити кривизну лінії сканування. Для цього раціональним є розташування об'єкту дослідження таким чином, щоб ділянка, на якій відбувається сканування, розташовувалася максимально

близько до краю п'єзосканеру. Враховуючи метрологічні характеристики АСМ та максимально можливий розмір ділянки, який може бути відсканований даним пристроєм (13×13 мкм, тобто $x = 0,013$ мм), відносне зменшення довжини лінії сканування становитиме:

$$\Delta x = 0,013 \cdot \frac{15 - 0,013}{15} = 0,0129 \text{ мм.}$$

Тоді, похибка нелінійності сканування становитиме:

$$\delta_4 = \frac{0,013 - 0,0129}{0,013} = 0,0077.$$

Таким чином, за умови розташування досліджуваної ділянки якомога ближче до краю п'єзосканеру, похибка нелінійності сканування не перевищуватиме 1%.

Інструментальна похибка (δ_5) – безпосередньо, похибка точності виготовлення та дотримання форми і розмірів вимірювального інструменту (зонду АСМ) в процесі його експлуатації та модифікування. Так, забруднення вимірювального інструменту з одночасними пошкодженнями його поверхні та, навіть, її руйнування ведуть до некоректного визначення та інтерпретації результатів дослідження, рис.Д.9. Надійним способом усунення даної похибки (зведення її значення до мінімуму) є своєчасне визначення дефектів інструменту та його заміна. З іншого боку зменшення

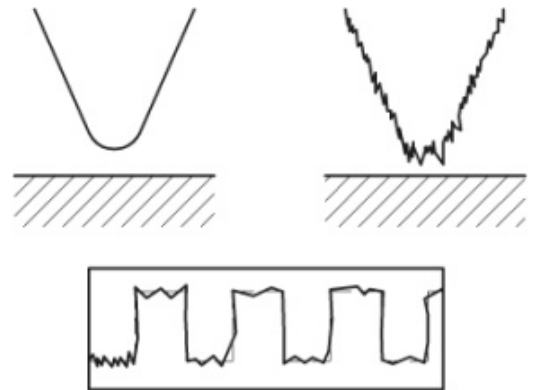


Рисунок Д.9 – Приклад виникнення інструментальної похибки та некоректної інтерпретації результатів дослідження

інструментальної систематичної похибки можливе при застосуванні до вимірювального інструменту методу заміщення, а саме: до та після кожного циклу досліджень проведення вимірювання топології тестових структур при тих самих режимах, з наступним порівнянням тестових вимірювань. Різниця

в результатах вимірювання визначатиметься, як невиключена систематична похибка вимірювального інструменту АСМ. Відносна похибка при цьому становитиме:

$$\delta_5 = \left| \frac{Z_{etal1} - Z_{etal2}}{Z_{etal1}} \right|, \quad (Д.5)$$

де Z_{etal1} , Z_{etal2} – відповідно, середні значення вимірюваної величини, отриманої при вимірюванні топології тестових структур до та після основних досліджень.

Наприклад, при дослідженні пластини з монокристалічного (n-Si(111)) кремнію, середні значення мікронерівностей еталонного зразка до та після основних досліджень, відповідно, становило: $Z_{etal1} = 6,96$ нм; $Z_{etal2} = 7,02$ нм. В такому випадку, відносна інструментальна похибка становить:

$$\delta_5 = \left| \frac{6,96 - 7,02}{6,96} \right| = 0,0086.$$

Дане значення відносної інструментальної похибки менше 1%. Проте, слід враховувати, що різниця $Z_{etal1} - Z_{etal2}$ залежить від режимів та виду проведення досліджень, а також їхньої кількості; при цьому збільшення цієї різниці від досліду до досліду відбувається не рівномірно.

Для виключення даної похибки при розрахунках вимірюваних параметрів, необхідно враховувати знайдену різницю, а також систематичну похибку еталонного засобу вимірювання ($\Delta_{ЕЗВ}$) при визначенні параметрів поверхні в процесі їх вимірювання:

$$Z_o = Z + (Z_{etal1} - Z_{etal2}) \pm \Delta_{ЕЗВ}, \quad (Д.6)$$

де Z_o – дійсне значення вимірюваної величини.

Методичні похибки (δ_M) – похибки, які виникають при методичному визначенні сил взаємодії зонду АСМ з досліджуваною поверхнею, що перешкоджає отриманню коректних результатів дослідження мікронерівностей, фізико-механічних характеристик поверхні тощо. На величину методичної похибки впливає дія капілярних, електростатичних сил, сил пружного відновлення та електромагнітної взаємодії між зондом та

досліджуваною поверхнею.

Для визначення методичної похибки скористаємося наступним підходом. Поверхня попередньо підготовленого зразка (очищеного іонним травленням у вакуумі та висушеного до відносної вологості 0%) n-Si(111) досліджувалася при динамічному (дія електростатичних сил та сил електромагнітної взаємодії зведена до мінімуму, капілярні та пружні сили відсутні) та статичному (дія усіх сил максимальна) режимах. Відношення отриманих результатів топології поверхні (наприклад, середнього значення мікронерівностей зразка Z) визначали значення методичної похибки:

$$\delta_M = \left| \frac{Z_{ст} - Z_{дин}}{Z_{ст}} \right|, \quad (Д.7)$$

де $Z_{ст}$, $Z_{дин}$ – відповідно, середні значення вимірюваної величини, отриманої при вимірюванні топології зразка в статичному та динамічному режимах.

Наприклад, при дослідженні пластини з монокристалічного (n-Si(111)) кремнію, середні значення мікронерівностей зразка виміряні, відповідно, в статичному та динамічному режимах становили: $Z_{ст} = 7,63$ нм; $Z_{дин} = 7,59$ нм. Тоді, відносна інструментальна похибка становить:

$$\delta_M = \left| \frac{7,63 - 7,59}{7,63} \right| = 0,0052.$$

Таким чином, методична похибка не перевищує 1%. Не дивлячись на той факт, що динамічний режим більш точний при визначенні параметрів топології твердих сухих поверхонь ($(Z_{дин} - Z_{ем}) < (Z_{ст} - Z_{ем})$), використання цього режиму обмежене можливістю виникнення гістерезисних похибок, а також складністю враховування похибок пов'язаних з гармонічним рухом вільного кінця консолі через специфічність реалізації даного режиму. В той же час, значне зменшення впливу методичної похибки при використанні статичного режиму роботи пристрою здійснюється шляхом вивчення та корегування механізму силової взаємодії досліджуваного зразка із зондом, а також мінімізації лімітуючих сил взаємодії.

Випадкові (стохастичні) похибки ($\delta_{ст}$) – похибки, виникнення яких не

залежить від точності та якості методично-інструментальної бази, а також кваліфікації оператора, і є набором ймовірнісних факторів, попереднє встановлення яких неможливе.

В процесі проведення вимірювань, паралельно з детермінованими виникають і стохастичні процеси (кліматичні (дія умов зовнішнього середовища: температури, вологості, тиску), механічні (вібрації, акустичні шуми) та енергетичні (зовнішній тепловий та електромагнітний вплив), для яких неможливо передбачити ступінь їхнього впливу на точність вимірювання та характер фізичної величини, що впливає на результат такого вимірювання. При оцінці фізичної величини, що підлягає вимірюванню, враховується не конкретне фіксоване значення, а область, в якій знаходяться виміряні значення цієї величини. Отже, при кожних наступних вимірюваннях через зміну характеру інтенсивності показників, що мають вплив на результат вимірювання, буде отримуватися новий результат вимірювання, що може радикально різнитися від попередньо отриманих результатів.

Тому результати контролю під впливом таких чинників слід розглядати як випадкові (стохастичні) величини, які підпорядковуються закономірностям, встановлюваним при математичній обробці результатів багаторазових вимірювань.

При цьому, визначення стохастичної похибки зводиться до визначення її середньоквадратичного відхилення (СКВ), що виникає від впливу кліматичних, фізико-механічних та енергетичних факторів і визначається, як:

$$S_{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_{\text{вип } i}^2}{(n-1)}}, \quad (\text{Д.8})$$

де $\delta_{\text{вип } i}$ – значення відносної випадкової похибки при i -му вимірюванні; n – кількість проведених вимірювань випадкової похибки).

За результатами експериментально визначених значень відносної похибки контролю $\delta_{\text{вип } i}$ для встановлених діапазонів параметрів зовнішніх

умов (кліматичних, механічних, тощо) при кількості проведених вимірювань $n = 10$, максимальне значення СКВ становить:

$$S_{\text{max}} = \sqrt{\frac{0,0052^2 + 0,005^2 + 0,0056^2 + 0,0057^2 + 0,0055^2 + 0,0056^2 + 0,0056^2 + 0,0055^2 + 0,0056^2 + 0,0057^2}{10-1}} = 0,0057.$$

При проведенні розрахунків слід враховувати, що стохастичні похибки не можуть бути визначені завчасно, проте їхня мінімізація зводиться до дотримання оптимальних умов сканування та зовнішніх умов впливу на процес сканування.

Остаточно маємо, що відносна похибка результатів контролю складається зі систематичної та випадкової складових і може бути визначена:

$$\delta_{\Sigma} = K \cdot \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2 + \delta_M^2} + t_{0,95} \cdot S_{\text{max}}, \quad (\text{Д.9})$$

де $K = 0,8$ – коефіцієнт, що залежить від відношення границі систематичної складової похибки до стандартного відхилення випадкової складової (для умови $0,8 \leq v \leq 8$, де $v = \Delta_{\text{с.дов}}/S_v = 0,041 / 0,0057 = 7,19$); δ_1 – похибка позиціонування лазера системи фотодетектування на консолі; δ_2 – похибка, яка виникає при неправильному розташуванні п'єзочипу у тримачі; δ_3 – похибка нерівномірності підведення зонду до зразка; δ_4 – похибка нелінійності сканування; δ_5 – сумарна інструментальна похибка; δ_M – сумарна методична похибка; $t_{0,95} = 2,262$ – квантиль розподілу Стюдента за довірчої ймовірності 0,95 при кількості проведених вимірювань $n = 10$.

Така похибка, згідно ISO/IEC 17025:2006, не повинна перевищувати 5,5%, що гарантує дотримання необхідної точності та надійності вимірювання.

Значення відносної похибки:

– для базового варіанту:

$$\delta_{\Sigma} = 0,8 \cdot \sqrt{0,0336^2 + 0,0148^2 + 0,034^2 + 0,0077^2 + 0,0086^2 + 0,0052^2} + 2,262 \cdot 0,0057 = 0,8 \cdot 0,0516 + 0,0129 = 0,05418 \approx 5,42\% < 5,5\%.$$

– для варіанту з використанням автоматизованої системи контролю:

$$\delta_{\Sigma} = 0,8 \cdot \sqrt{0,0078^2 + 0,0065^2 + 0,007^2 + 0,0077^2 + 0,0086^2 + 0,0052^2} + 2,262 \cdot 0,0057 = 0,8 \cdot 0,0177 + 0,0129 = 0,027 \approx 2,7\% < 5,5\%.$$

Як бачимо, умова дотримання необхідної точності контролю згідно ISO/IEC 17025:2005 дотримана в обох випадках. Проте, проведення комплексних досліджень різних матеріалів та компонентів МСТ в звичайних (не ідеалізованих) умовах може збільшувати сумарну похибку до значень, що перевищують значення визначене в стандарті, що є недопустимим.

Порівняння результатів розрахунку складових сумарної похибки для базового варіанту процесу контролю методом АСМ, та для варіанту контролю з використанням автоматизованої системи на базі розробленого у роботі методичного, інструментального та апаратно-математичного забезпечення наведене в табл. Д.1.

Таблиця Д.1 – Результати розрахунку складових сумарної похибки

Найменування похибки	Значення похибки процесу контролю методом АСМ	
	Базовий варіант	Варіант з використанням автоматизованої системи
Похибка позиціонування, δ_1	0,0336	0,0078
Похибка розташування п'єзочипу у тримачі, δ_2	0,0148	0,0065
Похибка нерівномірності підведення зонду до зразка, δ_3	0,034	0,007
Похибка нелінійності сканування, δ_4	0,0077	0,0077
Сумарна інструментальна похибка, δ_5	0,0086	0,0086
Сумарна методична похибка, δ_M	0,0052	0,0052
Загальна похибка, δ_{Σ}	0,05418 < 0,055	0,027 < 0,055

ДОДАТОК Е

Список опублікованих праць за темою дисертації

[1] Г. М. Дубровська, Н. І. Божко та М. О. Бондаренко, *Приклади застосування фізичних методів дослідження структури поверхні* (Удоун Офсет Принтерс, Сільхет, 2007), 248 с.

[2] В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, О. В. Верцанова, Ю. Ю. Бондаренко, С. О. Біло-кінь та М. О. Бондаренко, *Мікроскопія в нанотехнологіях* (НТУУ «КПІ», Київ, 2014), 258 с.

[3] В. С. Антонюк, Г. С. Тимчик, Ю. Ю. Бондаренко, С. О. Білокінь, С. П. Раль-ченко, В. О. Андрієнко та М. О. Бондаренко, *Контроль параметрів якості функціональних покриттів* (НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, 2018), 396 с.

[4] М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко и С. А. Шелестовская, “Исследование состояния поверхности кремниевых зондов для атомно-силовой микроскопии на точность и качество получаемых топограмм”, *Электроника и связь*. **61** (2). 14 – 17 (2011). (видання включене до міжнародної наукометричної бази даних *IndexCopernicus*).

[5] Ю. І. Коваленко, М. О. Бондаренко та Ю. Ю. Бондаренко, “Вплив режимів ультразвукового очищення п'єзоелектричних елементів на якість сформованих на їхніх поверхнях срібних електродів”, *Вісн. Нац. техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут”*. **64**. 87 – 90 (2012). (видання включене до міжнародних наукометричних баз даних: *Index Copernicus*, *Open Academic Journals Index (OAJI)*, *CiteFactor*, *WorldCat*, *BASE*, *EBSCO* та індексується директорією відкритого доступу (*DOAJ*)).

[6] В. С. Антонюк, П. О. Фіалковський та М. О. Бондаренко, “Дослідження характеристик біологічних об'єктів методами атомно-силової та растрової електронної мікроскопії”, *Вісн. Нац. техн. ун-ту України “Київський політехнічний інститут”*. **47** (1). 145 – 149 (2014). (видання

включене до міжнародних наукометричних баз даних: *Index Copernicus, BASE, WorldCat, OpenAIRE*).

[7] М. О. Бондаренко, “Дослідження механічних характеристик елементів приладів точного приладобудування методом атомно-силової мікроскопії”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. (2), 21 – 28 (2015). (видання включене до міжнародної наукометричної бази даних *IndexCopernicus*).

[8] В. С. Антонюк, Ю. І. Коваленко, Ю. Ю. Бондаренко та М. О. Бондаренко, “Підвищення мікротвердості та зносостійкості поверхонь елементів виробів з оптичного скла мікрообробкою електронним потоком у вакуумі”, Вісн. Житомир. держ. технол. ун-ту. **72** (1). 3 – 8 (2015). (видання включене до міжнародних наукометричних баз даних: *Ulrich's Periodicals Directory, ResearchBib, UIF* та індексується директорією відкритого доступу (*DOAJ*)).

[9] С. Ан. Клименко, С. А. Клименко та М. О. Бондаренко, “Дослідження топографії контактних поверхонь інструментів із ПНТМ на основі КНБ”, Вісн. Житомир. держ. технол. ун-ту. **73** (2). 51 – 58 (2015). (видання включене до міжнародних наукометричних баз даних: *Ulrich's Periodicals Directory, ResearchBib, UIF* та індексується директорією відкритого доступу (*DOAJ*)).

[10] І. В. Дробот, Т. Ю. Уткіна, М. П. Рудь та М. О. Бондаренко, “Автоматизована система моделювання процесу електронної обробки оптичних матеріалів”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. (3), 38 – 41 (2006).

[11] В. М. Шарапов, А. М. Гуржій та М. О. Бондаренко, “Исследование характеристик токопроводящих электропроводных пьезокерамических элементов”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. (спецвипуск), 255 – 257 (2007).

[12] М. О. Бондаренко, “Дослідження впливу низькоенергетичного електронного потоку на мікрогеометрію поверхонь п'єзокерамічних елементів”, Труды Одесского политехнического университета. **32** (2), 149 – 153 (2009).

[13] M. A. Bondarenko, G. V. Kanashevich and H. V. Vertsanova, “Study of forming terms thin diamond similar nanostructures thermal vacuum-depositing”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. (спецвипуск), 114 – 116 (2009).

[14] М. О. Бондаренко, О. В. Котляр та Н. І. Божко, “Мікрогеометрія плівкових композиційних матеріалів на основі $\text{CuO-BaO-La}_2\text{O}_3$ ”, Вісн. Черкас. держ. технол. ун-ту. (2), 55 – 58 (2009).

[15] М. О. Бондаренко, В. А. Ващенко та С. О. Білокінь, “Вивчення умов утворення наноструктур на поверхнях п’єзоелектричних керамік під дією стрічкового електронного потоку”, Вісн. Східноукр. Нац. ун-ту ім. В. Даля. **162** (8). 30 – 34 (2011).

[16] С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко и Ю. Ю. Бондаренко, “Определение адгезионной прочности тонких оксидных покрытий на диэлектрических материалах методом атомно-силовой микроскопии”, Зб. наук. праць “Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології”. **12** (2). 295 – 302 (2014).

[17] М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко та В. С. Антонюк, “Перспективи використання методу атомно-силової мікроскопії для дослідження стану та фізико-механічних характеристик поверхонь виробів прецизійного машинобудування”, Вісн. нац. ун-ту «Львівська політехніка». (822), 72 – 77 (2015).

[18] С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко та Ю. Ю. Бондаренко, “Дослідження фізичних характеристик діелектричних поверхонь за допомогою діагностичного стенда на базі АСМ”, Вісн. Чернігів. держ. технол. ун-ту. **78** (2), 176 – 181 (2015).

[19] С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко и В. С. Антонюк, “Влияние сил адгезии между исследуемой поверхностью и зондом для атомно-силовой микроскопии”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва). **12** (6). 41 – 45 (2012). URL: <http://www.mashin.ru/eshop/journals/nanoinzheneriya/2012/07/> (іноземне видання).

[20] V. S. Antonyuk, M. A. Bondarenko and Yu. Yu. Bondarenko, “Studies of thin wear-resistant carbon coatings and structures formed by thermal evaporation in a vacuum on piezoceramic materials”, Journal of superhard materials. **34** (4). 248 – 255 (2012). URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1063457612040065> (*іноземне видання*).

[21] С. А. Билоконь, О. В. Свиридова, В. С. Антонюк и М. А. Бондаренко, “Повышение точности и срока эксплуатации зондов для атомно-силовой микроскопии”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва). **19** (1). 10 – 13 (2013). URL: <http://www.mashin.ru/eshop/journals/nanoinzheneriya/2013/18/> (*іноземне видання*).

[22] В. С. Антонюк, С. А. Билоконь и М. А. Бондаренко, “Особенности измерения микротвердости диэлектрических поверхностей кремниевым зондом атомно-силового микроскопа”, Ежем. науч.-техн. и произв. журн. “Наноинженерия” (Машиностроение. Москва). **33** (3). 13 – 16 (2014). URL: <http://www.mashin.ru/eshop/journals/nanoinzheneriya/2024/3/> (*іноземне видання*).

[23] V. S. Antonyuk, S. O. Bilokin and M. O. Bondarenko, “Formation of Wear-Resistant Coatings on Silicon Probes for Atomic Force Microscopy by Thermal Vacuum Evaporation”, Journal of superhard materials. **37** (2), 112 – 119 (2015). URL: <https://link.springer.com/article/10.3103/S1063457615020057> (*іноземне видання*).

[24] M. Bondarenko, I. Bondarenko and V. Antoniuk, “Peculiarities of metalized surfaces modification of silicon elements of microelectromechanical systems with low-power electronic flow”, Materials science. Non-equilibrium phase transformations. III (2). 2017, 53 – 55 (2017). URL: <http://stumejournals.com/journals/ms/2017/2/53> (*іноземне видання*).

[25] М. О. Бондаренко, С. О. Білокінь та В.С.Антонюк, “Механізм виникнення та нейтралізація залишкової трибоелектрики при скануванні

кремнієвим зондом атомно-силового мікроскопу діелектричних поверхонь”, Ж. нано- електрон. фіз. **6** (2), 02018 – 1 (2014).

[26] В. С. Антонюк, Ю. Ю. Бондаренко та М. О. Бондаренко, “Перспективи використання методу атомно-силової мікроскопії при комплексному контролі елементів приладів точного приладобудування”, Зб. наук. праць “Перспективні технології та прилади”. (5). 5 – 9 (2014).

[27] В. С. Антонюк, С. О. Білокінь та М. О. Бондаренко, “Спосіб оцінки мікротвердості”, Патент України на корисну модель № 87907 (25 Лютий, 2014).

[28] С. О. Білокінь, В. С. Антонюк та М. О. Бондаренко, “Спосіб видалення залишкового трибоелектричного заряду”, Патент України на корисну модель № 91425 (10 Липень, 2014).

[29] С. О. Білокінь, В. С. Антонюк, Ю. І. Коваленко та М. О. Бондаренко, “Спосіб позиціонування лазерного променя на зонд атомно-силового мікроскопу”, Патент України на корисну модель № 91523 (10 Липень, 2014).

[30] С. О. Білокінь, В. С. Антонюк та М. О. Бондаренко, “Спосіб оцінки зносостійкості тонких покриттів”, Патент України на корисну модель № 117635 (26 Червень, 2017).

[31] М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко и Г. В. Канашевич, “Исследование поверхностей пьезокерамических элементов, модифицированных электронным потоком методом АСМ”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тезисы докл. VIII Междунар. сем. (Беларуская навука, Минск, 2008), с. 23 – 26.

[32] М. О. Бондаренко, Н. І. Божко та О. В. Котляр, “Вимірювання товщини тонких композиційних покриттів в процесі їхнього осадження у вакуумі”, в: Приладобудування – 2009: стан і перспективи: тези доп. VIII міжнар. наук.-техн. конф. (НТУУ “КПІ”, Київ, 2009), с. 188 – 189.

[33] М. А. Бондаренко, М. П. Мусиенко та Ю. Ю. Бондаренко, “Виртуальная лаборатория атомно-силовой микроскопии и нанометрических исследований в современном технологическом университете”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тезисы докл. IX Междунар.сем. (Беларуская навука, Минск, 2010), с. 136 – 141.

[34] M. A. Bondarenko, J. J. Bondarenko and S. A. Shelestovskaya, “Research of influence of the state of surface of probes for AFM on exactness and quality of the topograms”, in: Electronics and nanotechnology ELNANO 2011: thesis XXXI Intern. Scien. Conf. (NTUU “KPI”, Kyiv, 2011), pp. 60.

[35] M. A. Bondarenko, “Necessity of creation of virtual laboratory of physical research of materials”, in: System analysis and information technologies SAIT 2011: thesis Intern. conf. of science and tech. (ESC “IASA” NTUU “KPI”, Kyiv, 2011), pp. 404.

[36] М. А. Бондаренко, С. А. Шелестовская и А. В. Котляр, “Исследование кремниевых зондов атомно-силовых микроскопов, восстановленных комбинированным термовакуумным методом”, в: Растровая электронная микроскопия и аналитические методы исследования твёрдых тел РЭМ-2011: тезисы докл. XVII Рос. симпоз. (Черноголовка, 2011), с.78–79.

[37] М. А. Бондаренко, С. А. Шелестовская и Ю. Ю. Бондаренко, “Влияние микротвердости исследуемого материала на эксплуатационную пригодность зондов для АСМ”, в: Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: тезисы докл. XIX междунар. конф. (Киев, 2011), с. 192 – 193.

[38] М. А. Бондаренко, В. А. Андриенко и С. А. Билоконь, “Создание виртуальной лаборатории атомно-силовой микроскопии в технологическом университете”, в: Электронная микроскопия: тез. докл. XXIV Рос. конф. (Черноголовка, 2012), с.210–211.

[39] С. А. Билоконь, И. А. Рева и М. А. Бондаренко, “Гидрофильное взаимодействие зонда атомно-силового микроскопа с диэлектрической поверхностью”, в: Фізика і хімія твердого тіла: стан, досягнення та

перспективи: тези доп. II Всеукр. наук.-практ. конф. мол. вчен. та студ. (Луцьк, 2012), с. 33 – 35.

[40] С. А. Билоконь, И. А. Рева и М. А. Бондаренко, “Математическое моделирование процесса деформации измерительной системы АСМ и расчет допустимых режимов ее работы” в: Методол. аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тезисы докл. X Междунар. конф. (Беларуская навука, Минск, 2012), с. 297 – 301.

[41] М. О. Бондаренко, Ю. І. Коваленко та І. А. Рева, “Оцінка адгезійної міцності на стирання оксидних покриттів на оптичному склі методом АСМ”, в: Приладо-будування: тези доп. XII міжнар. наук.-техн. конф. (НТУУ “КПІ”, Київ, 2013), с. 207.

[42] Y. I. Kovalenko, M. A. Bondarenko and E. V. Vertsanova, “Study of ordered oxide patterns got on the dielectric surfaces with the combined electronic technology”, in: Physics and tech. of thin films and nanosyst.: thesis XIV Intern. conf. (Ivano-Frankivsk, 2013), pp. 92.

[43] M. Bondarenko, Iu. Bondarenko and S. Bilokin, “Features of study of thin oxide coverages on the elements of microoptics and nanoelectronics by the method of AFM”, in: Electronics and Applied Physics: thesis IX intern. scient. conf. (Kyiv, 2013), pp. 54 – 55.

[44] С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко и Ю. Ю. Бондаренко, “Определение адгезионной прочности тонких оксидных покрытий на диэлектрических материалах методом АСМ”, в: Наноразмерные системы: строение, свойства, технологии НАНСИС-2013: тезисы докл. IV междунар. научн. конф. (НТУУ «КПІ», Киев, 2013), с. 369.

[45] М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко та В. О. Андрієнко, “Корегування точності вимірювання методом атомно-силової мікроскопії нанорозмірних структур утво-рених на поверхнях функціональних матеріалів”, в: Приладобудування: стан і перспективи: тези доп. XIII міжнар. наук.-техн. конф. (НТУУ «КПІ», Київ, 2014), с.83–84.

[46] Ю. И. Коваленко, М. А. Бондаренко и Ю. Ю. Бондаренко, “Измерение микротвердости тонких оксидных покрытий на оптических диэлектриках методом атомно-силовой микроскопии”, в: Электронная микроскопия: тезисы докл. XXV Рос. конф. (Черноголовка, 2014), с.308–309.

[47] С. А. Билоконь, М. А. Бондаренко и В. А. Андриенко, “Минимизация влияния капиллярных сил при исследовании поверхностей изделий наноэлектроники в контактном режиме атомно-силового микроскопа”, в: Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тезисы докл. XI Междунар. конф. (Беларуская навука, Минск, 2014), с. 164 – 168.

[48] С. О. Білокін, М. О. Бондаренко та В. С. Антонюк, “Керування змочуваністю зондів атомно-силового мікроскопу для біологічних досліджень”, в: Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів: матер. XIII міжнар. наук.-техн. конф. (КрНУ, Кременчук, 2014), с. 89 – 90.

[49] М. О. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко та С. О. Білокін, “Діагностичний стенд для вимірювання фізичних характеристик поверхні на базі АСМ”, в: Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС-2015): тези доп. V міжнар. наук.-практ. конф. (ЧНТУ, Чернігів, 2015), с. 214 – 215.

[50] В. С. Антонюк, М. О. Бондаренко та Ю. Ю. Бондаренко, “Склерометрична оцінка зносостійкості тонких покриттів методом АСМ”, в: Инженерия поверхности и реновация изделий: тез. докл. XV Междунар. науч.-техн. конф. (Киев, 2015), с.17–19.

[51] I. Yatsenko, V. Antoniuk and M. Bondarenko, “Influence of parameters by electronic ray on properties of superficial layers of optical elements of exact instrument-making”, in: Innovations in ingeneering: Intern. scien.-tech. conf. (Burgas, Bulgaria, 2015), pp. 64 – 66.

[52] М. О. Бондаренко та Ю. Ю. Бондаренко, “Автоматизований комплекс для нанометричних досліджень”, в: Фізика, електроніка, електро-техніка (ФЕЕ-2016): тези доп. наук.-техн. конф. (СумДУ, Суми, 2016), с. 200.

[53] M. Bondarenko and I. Bondarenko, “Power supply method of micro- and nanosystem engineering devices”, in: *Energy Challenges & Mechanics: 6th Intern. Symp.* (Inverness, 2016), pp. 245 – 246.

[54] С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко та В. С. Антонюк, “Автоматизація досліджень за допомогою АСМ”, в: *Качество, стандартизация, контроль: теорія и практика: тезисы докл. 16 Межд. науч.-практ. конф. (АТМ України, Киев, 2016)*, с. 214 – 216.

[55] М. А. Бондаренко, Ю. Ю. Бондаренко и С. А. Билоконь, “Энергетический теплообмен в зоне контакта зонда атомно-силового микроскопа с исследуемой поверхностью”, в: *Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: тезисы докл. XII Междунар. конф. (Беларуская навука, Минск, 2016)*, с. 235 – 241.

[56] Ю. Ю. Бондаренко, М. О. Бондаренко и С. О. Білокінь, “Підвищення терміну експлуатації зондів атомно-силового мікроскопу”, в: *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС –2017): тези доп. VII міжнар.наук.-практ.конф. (ЧНТУ, Чернігів, 2017)*, с.97–99.

[57] М. А. Бондаренко, К. В. Базило, Ю. Ю. Бондаренко и В. В. Медяник, “Изучение микроэлектромеханических пьезоэлектрических структур методом атомно-силовой микроскопии”, в: *Датчики, прилады та системи – 2017: тези доп. VI Міжнар. науково-техн. конф. (ФОП Чабаненко А.Ю., Черкаси, 2017)*, с. 45 – 48.

[58] С. О. Білокінь, М. О. Бондаренко та В. О. Андрієнко, “Преваги використання методу атомно-силової мікроскопії в діагностиці нанооб’єктів та систем”, в: *Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2018): тези доп. X міжнар. наук.-практ. конф. (НАУ, Київ, 2018)*, с. 100 – 102.

[59] I. I. Bondarenko, V. V. Medianyuk, M. A. Bondarenko and V. S. Titarenko, “Investigation of Ordered Structures Formed on the Surface of Piezoceramic Elements”, в: *Фізика, електроніка, електротехніка (ФЕЕ-2018): тези доп. наук.-техн. конф. (СумДУ, Суми, 2018)*, с. 86.